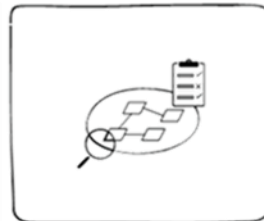
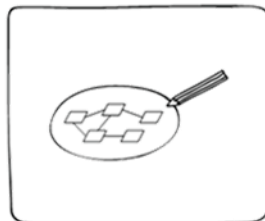
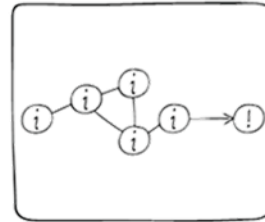
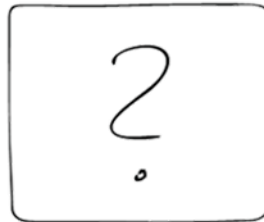


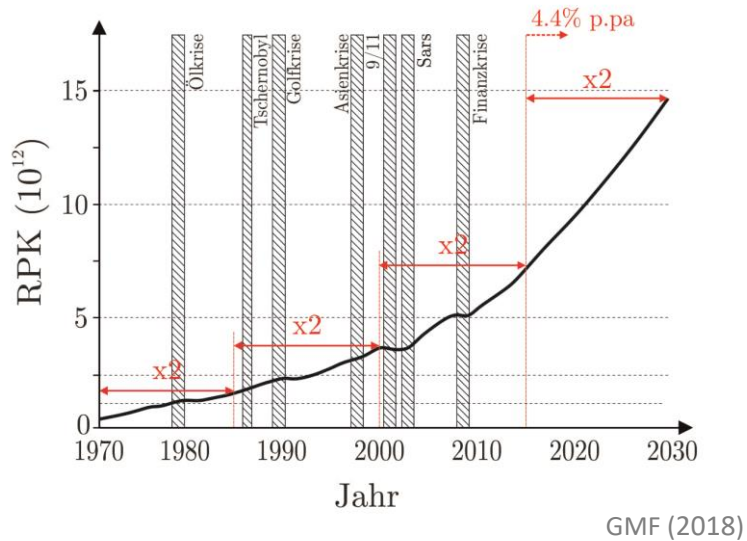
Ansätze zur Verringerung der Klimawirkung der Luftfahrt

Dr.-Ing. Malte Niklaß



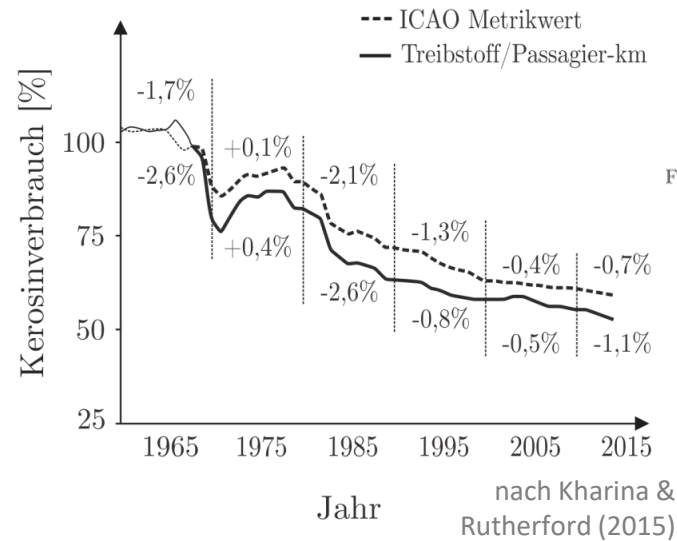
Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Weltweites Luftverkehrswachstum



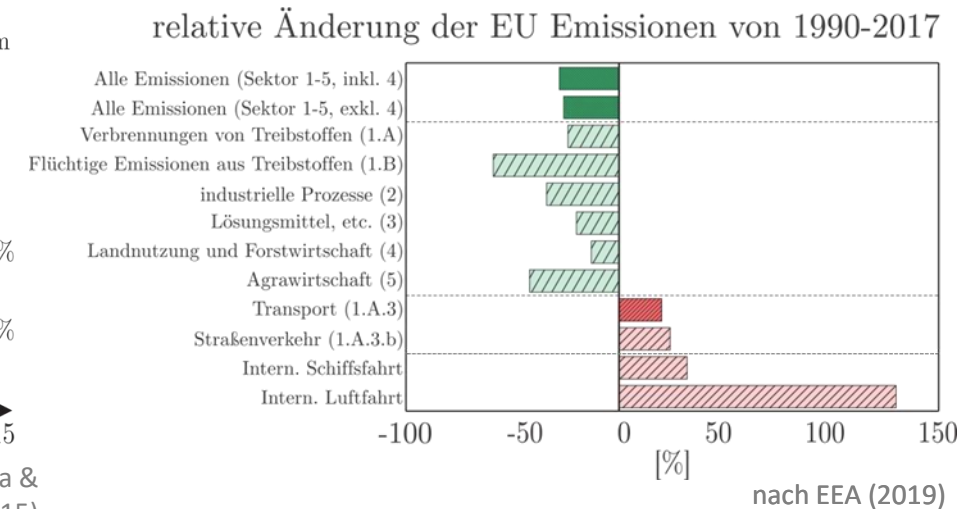
Die Beförderungsleistung des Lufttransports verdoppelt sich alle 15 Jahre ...

Hist. Treibstoffverbesserungsrate



... und übersteigt die jährliche Treibstoffverbesserungsrate des Lufttransports.

EU-Emissionen 1990-2017



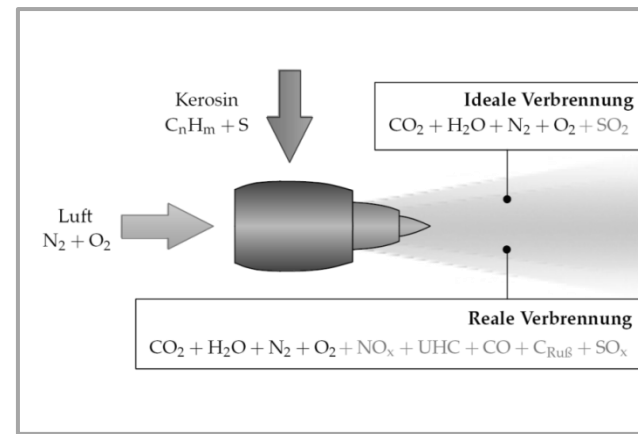
Der prozentuale Anteil an Luftverkehrsemissionen wird weiter zunehmen.

Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Direkte Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen

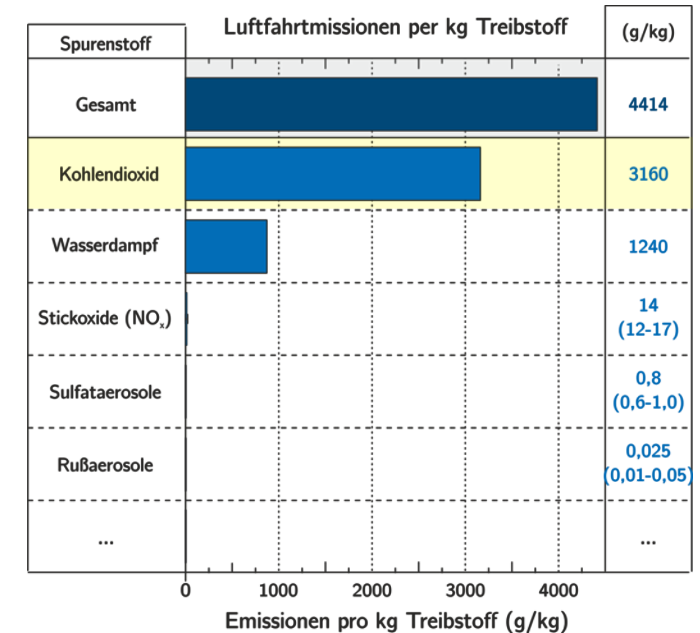
Die Klimawirkung ist abhängig von:

- Emissionsart
- Emissionsmenge



Nach IPCC (1999)

Luftverkehrsemissionen haben einen direkten Einfluss auf das Klima.



Art und Menge der Emissionen lassen sich punktuell gut messen und modellieren.



Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Indirekte Klimawirkung von Luftverkehrsemissionen

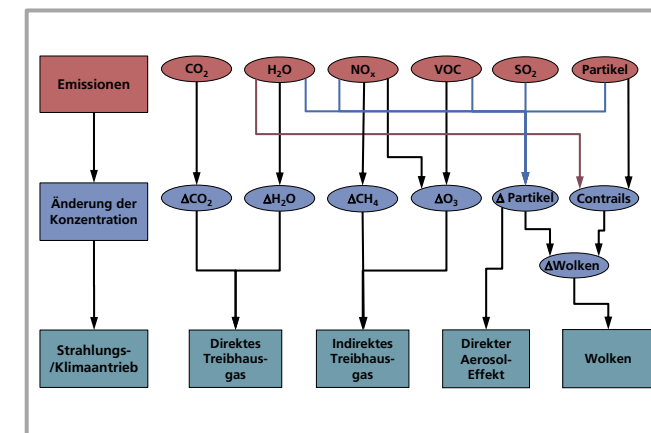
Die Klimawirkung ist abhängig von:

- Emissionsart
- Emissionsmenge
- Emissionsort (insbesondere Flughöhe)
- Emissionszeitpunkt
- Wetterverhältnisse



Shutterstock

Indirekte Effekte entstehen u.a. durch die Bildung von Kondensstreifen und Ozon.



nach IPCC (1999)

Wirkungen stark abhängig von Ort (insbesondere Höhe) und Zeitpunkt der Emissionen.

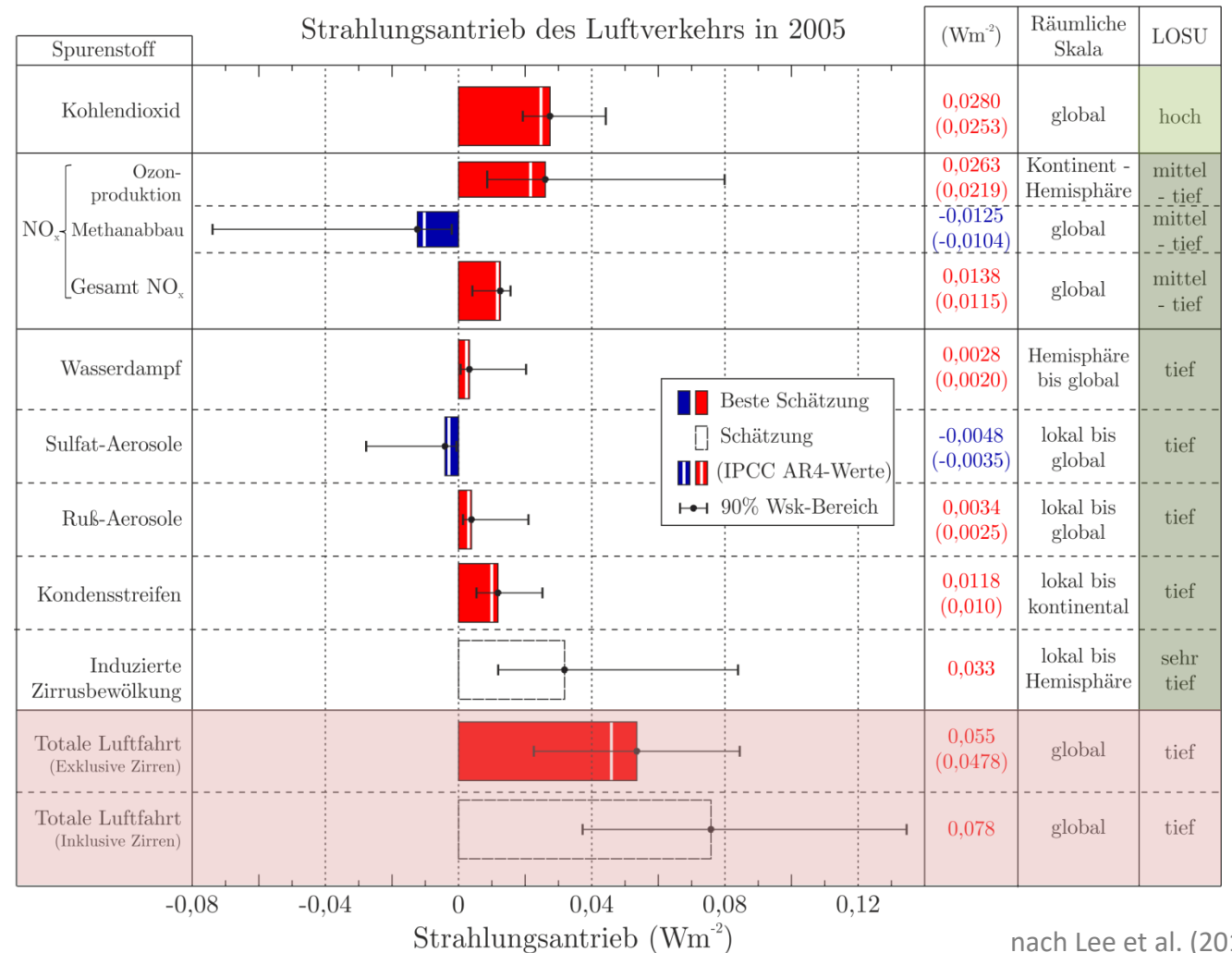


Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch

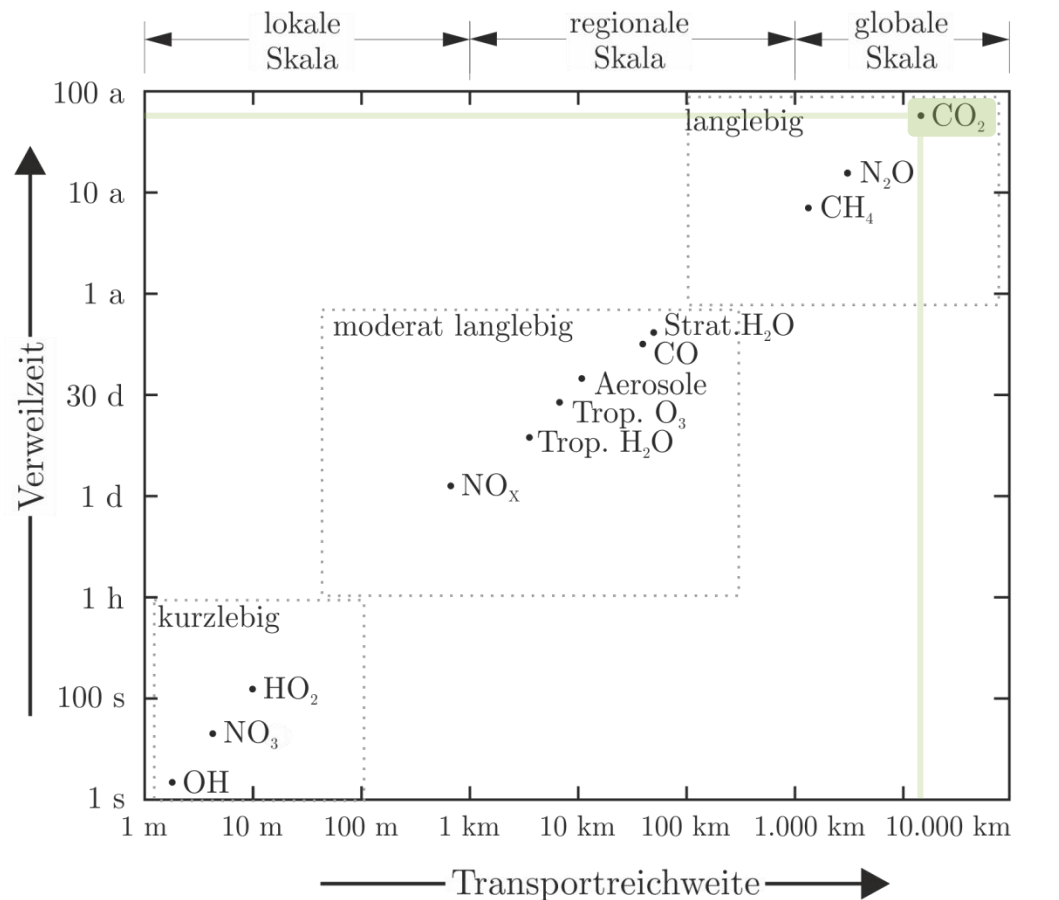
Die Klimawirkung ist abhängig von:

- Emissionsart
- Emissionsmenge
- Emissionsort (insbesondere Flughöhe)
- Emissionszeitpunkt
- Wetterverhältnisse

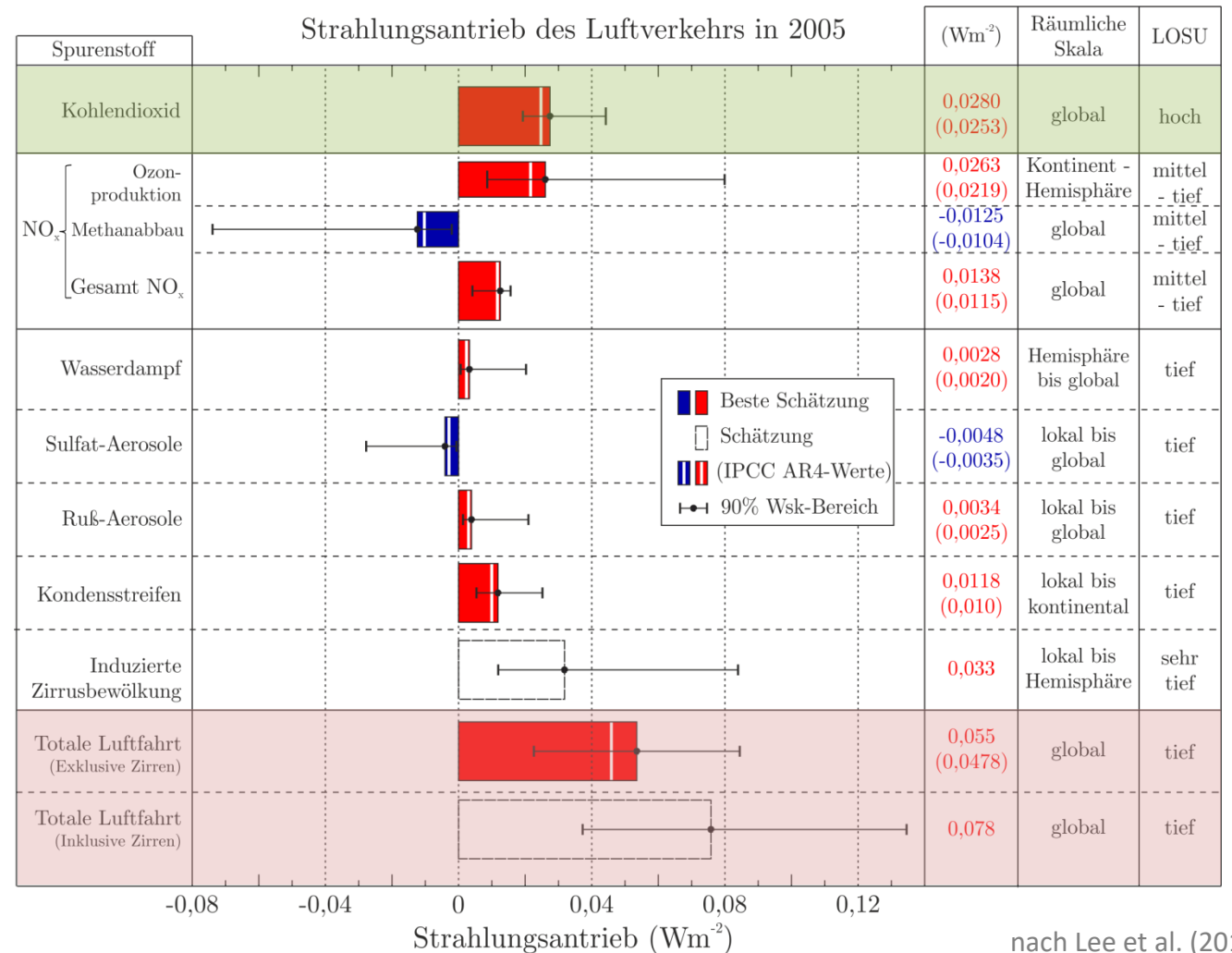


Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch



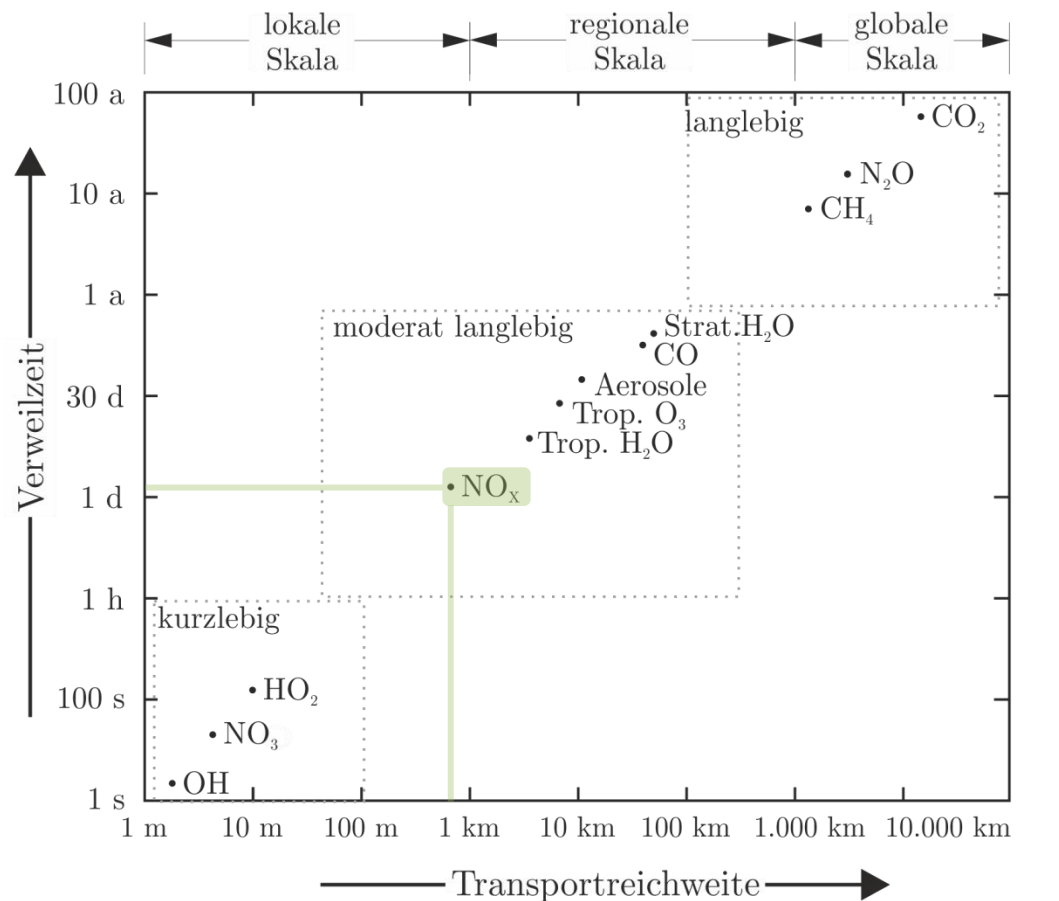
nach Brasseur et al. (1999)



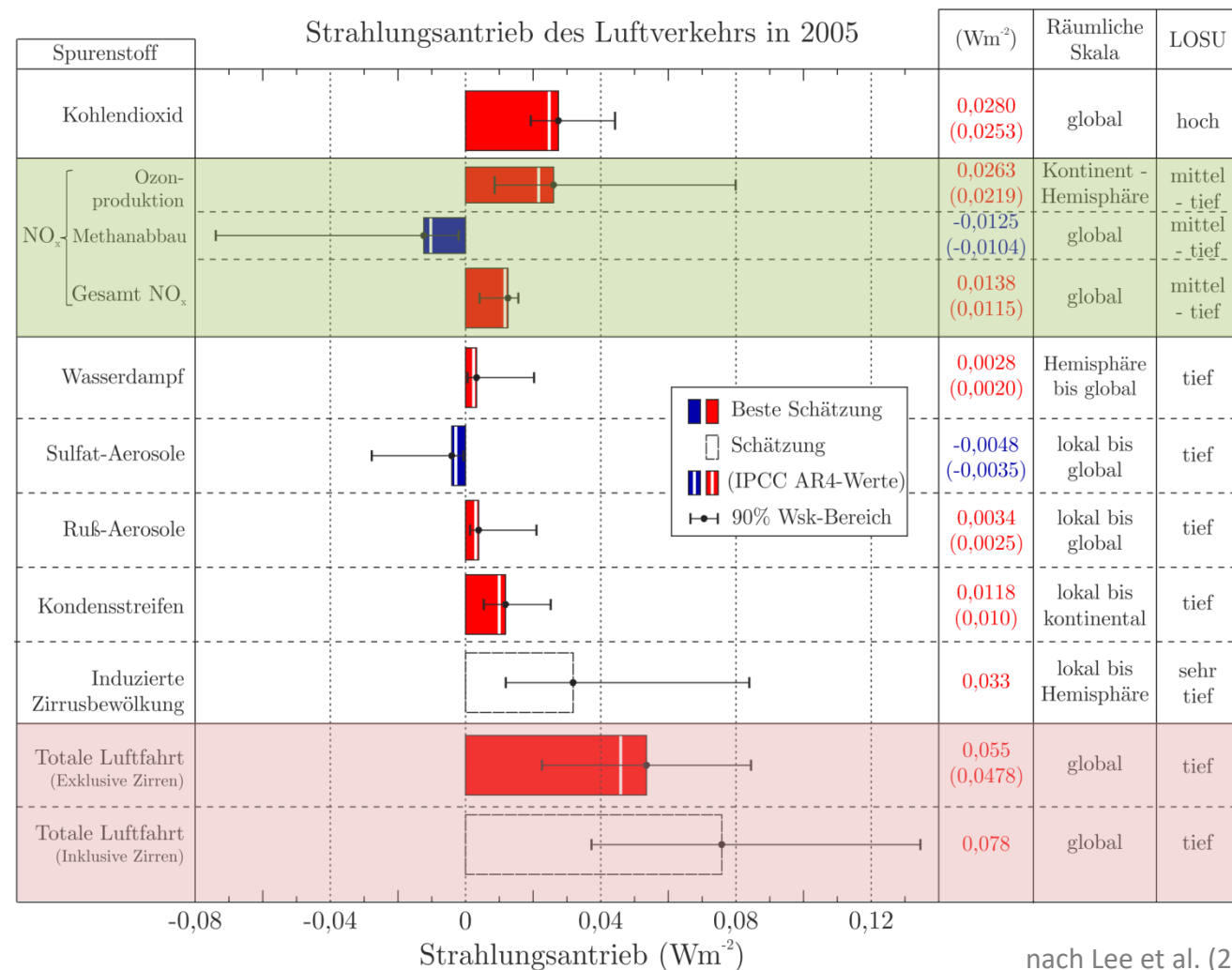
nach Lee et al. (2010)

Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch



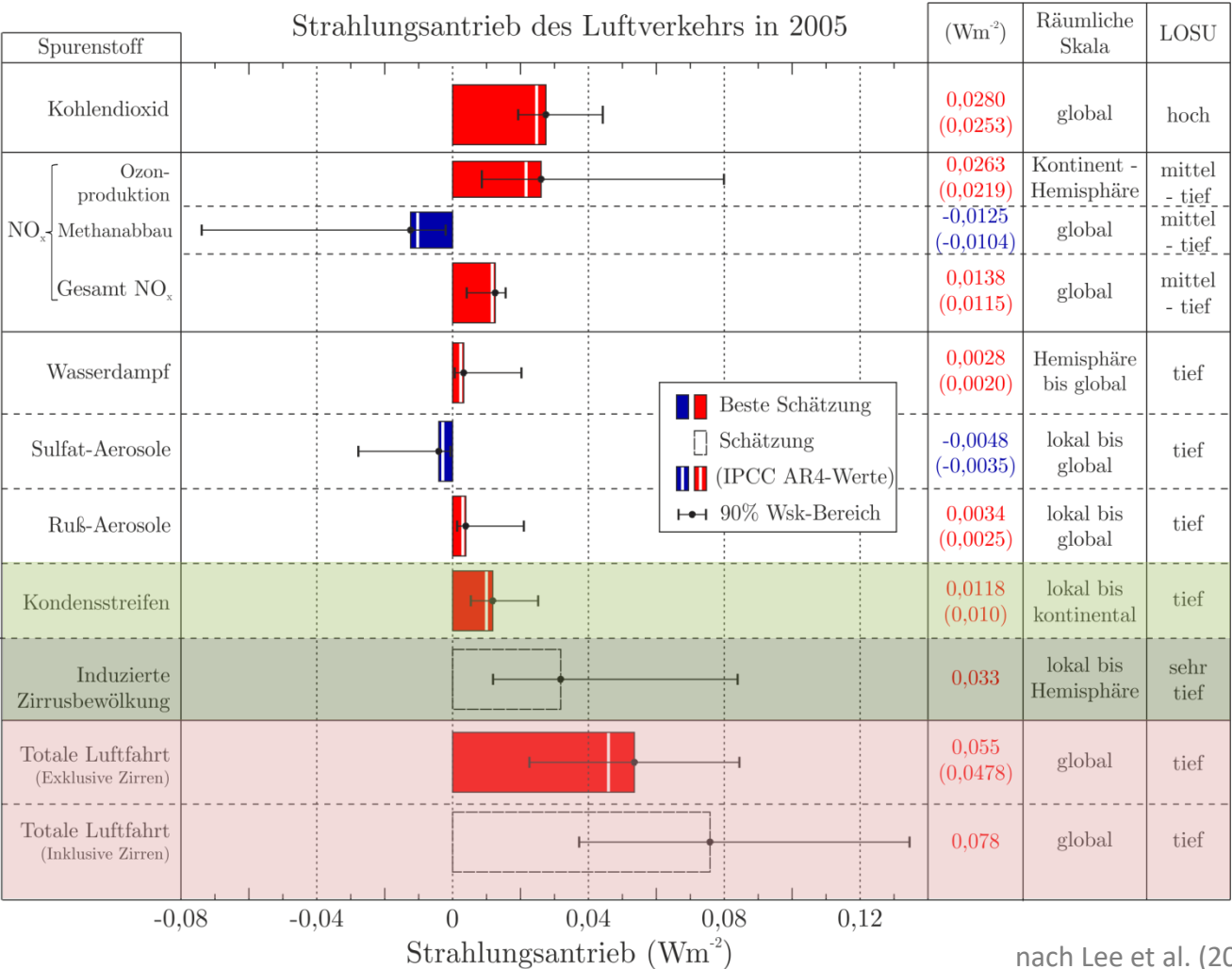
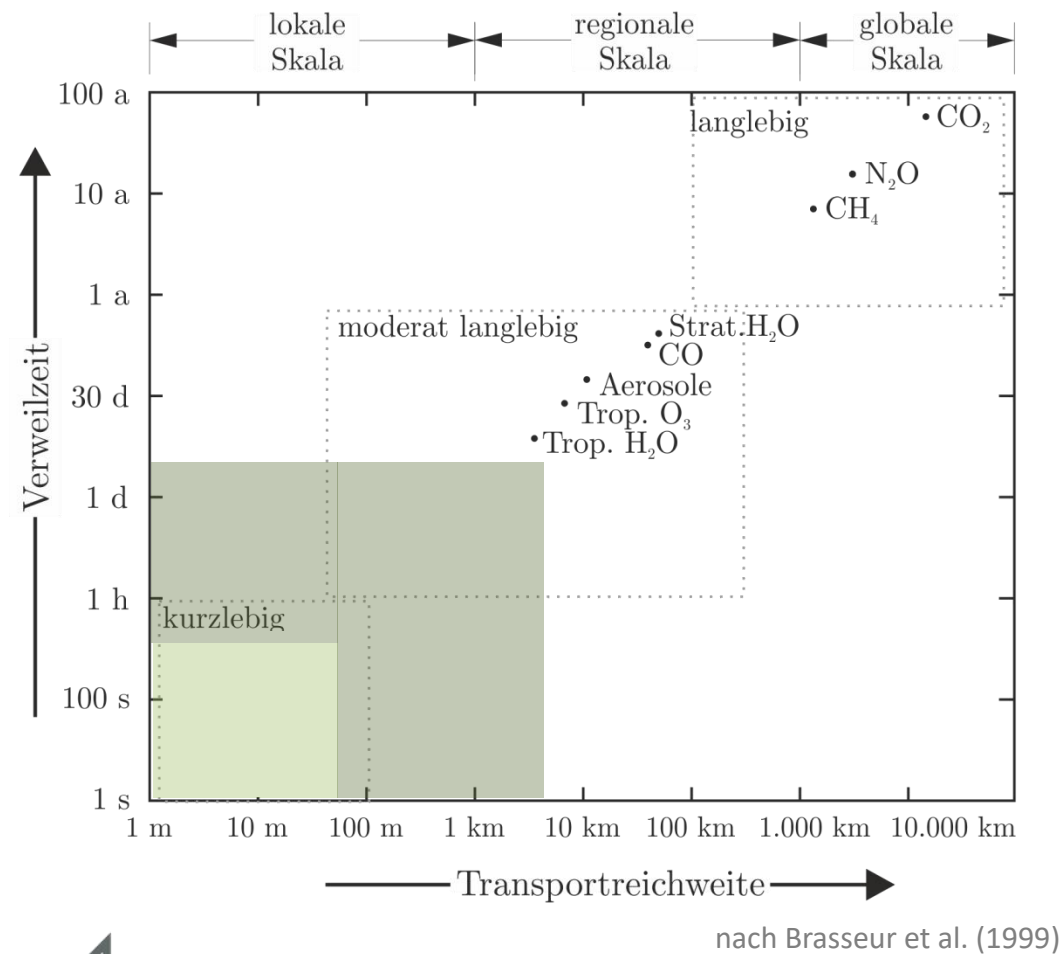
nach Brasseur et al. (1999)



nach Lee et al. (2010)

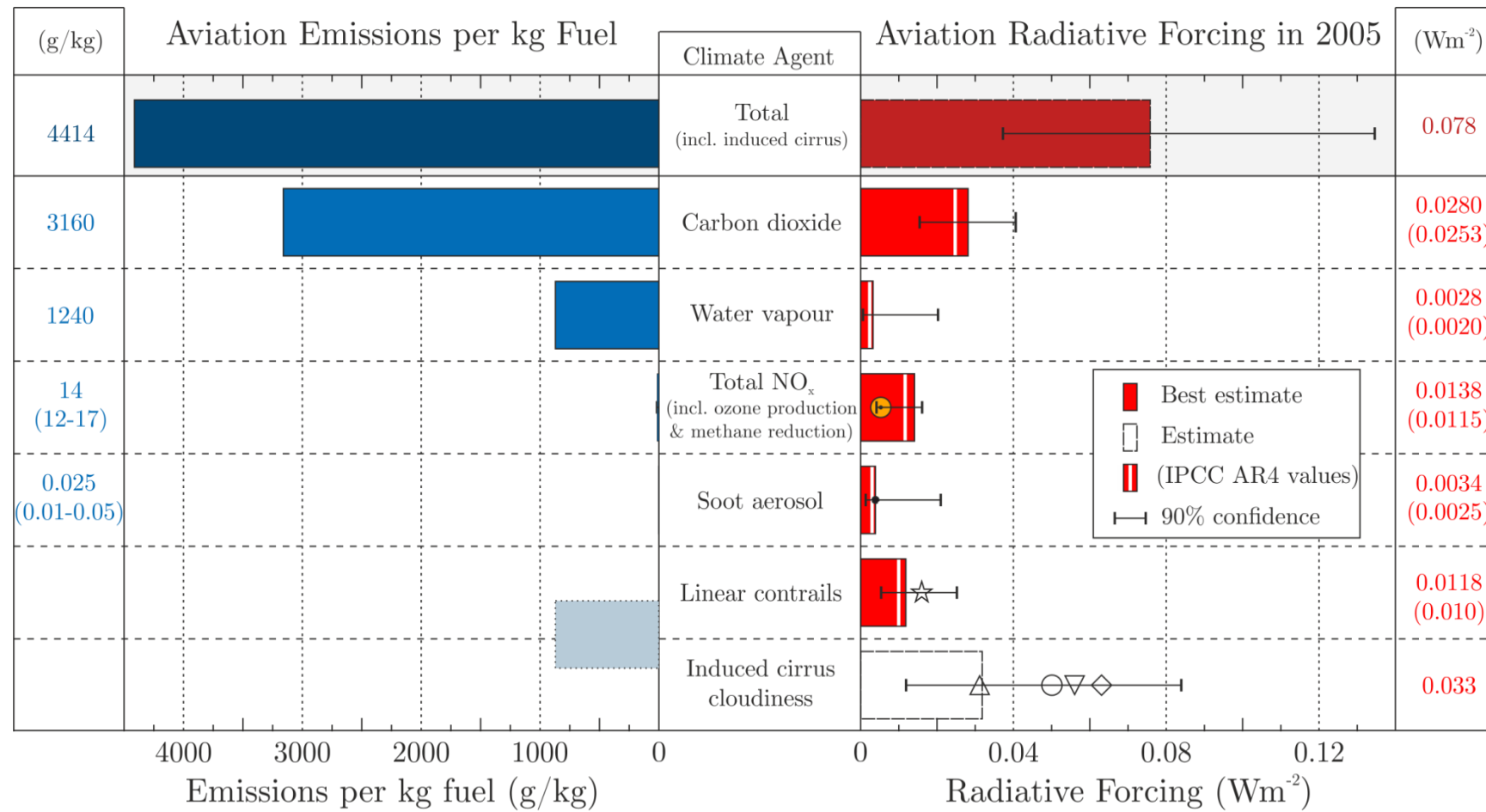
Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch



Klimaschutz im Luftverkehr: eine systemanalytische Herausforderung

Klimawirkung des Luftverkehrs nicht proportional zum Treibstoffverbrauch



Indirect impact of water vapour and soot emissions

● Søvde et al. (2014): multi-model mean

○ Schumann and Graf (2013)

△ Burkhardt and Kärcher (2011)

◇ Bock and Burkhardt (2016)

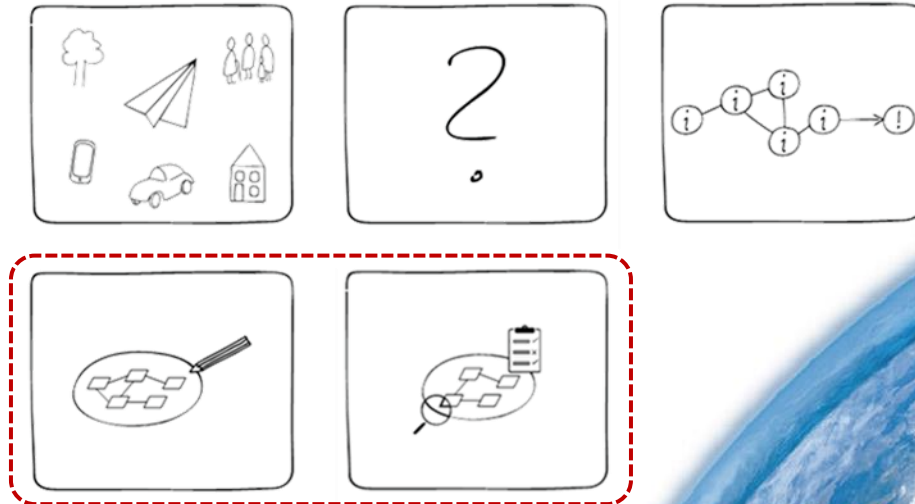
☆ Voigt et al. (2011)

▽ Schumann et al. (2015)

In Veröffentlichung Niklaß et al. (2020)

Wie kann die Klimawirkung der Luftfahrt reduziert werden?

Dr.-Ing. Malte Niklaß



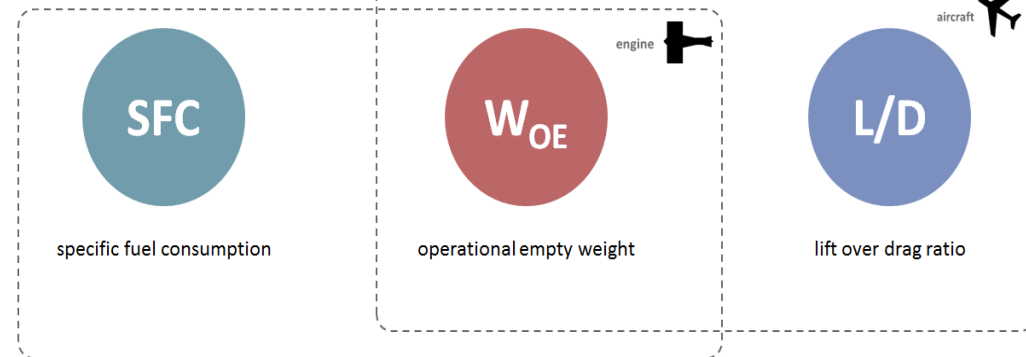
Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

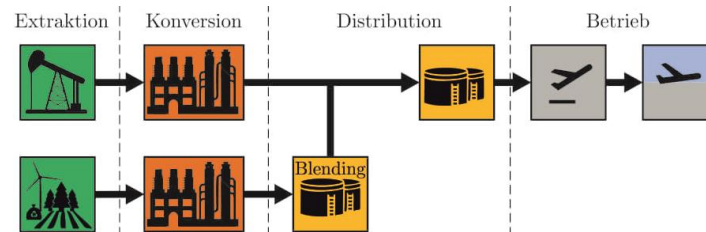
1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



Ghosh et al. (2017)



Niklaß und Meyer (2016)



Eurocontrol (2014)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

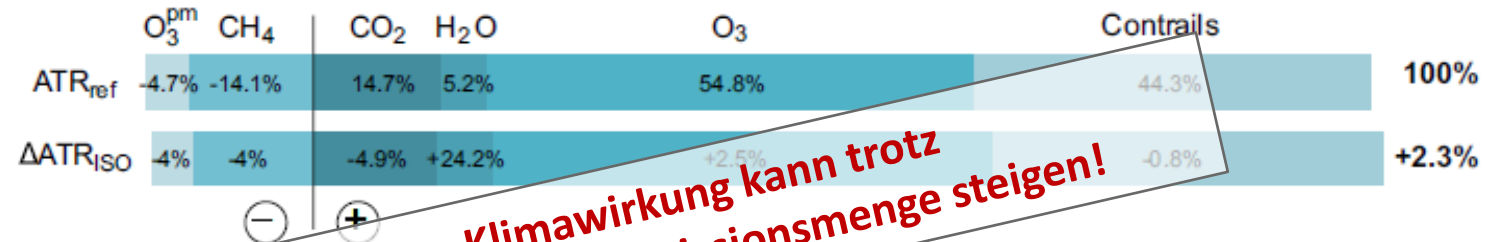
Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

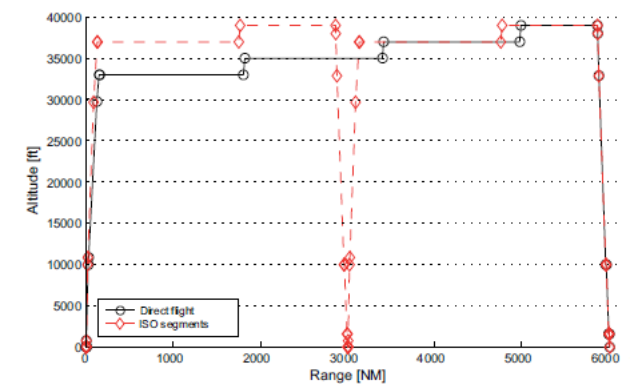
Veränderung der Emissionsart

Beispiel:

Intermediate Stop Operations



Emissions-einsparpotential	Maximal	Global
CO_2, H_2O, SO_2	-15%	-4,8%
NO_x	-14%	-4,6%
HC		+43,4%
CO		+33,3%



Nach Linke (2016)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



Schumann et al. (2000)



Schmidt (1941) und Appleman (1953)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

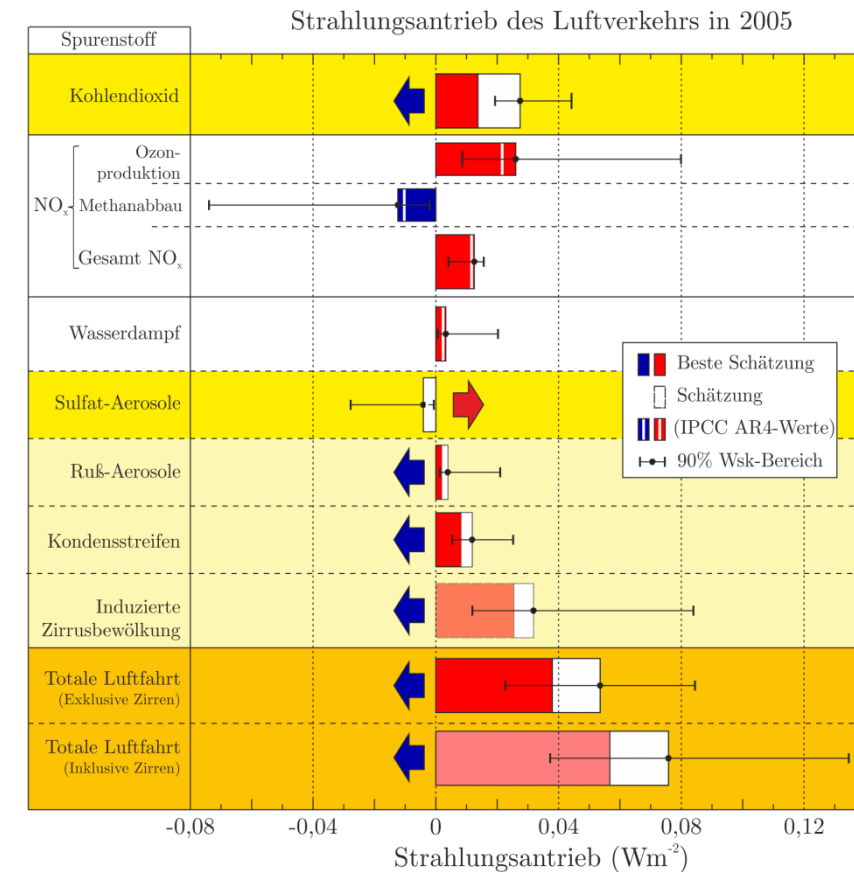
Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

1. Durch Herstellung synthetischer (Designer-)Treibstoffe ohne Rückstände von Schwefel, etc.

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



(Qualitatives Gedankenexperiment)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

1. Durch Herstellung synthetischer (Designer-)Treibstoffe ohne Rückstände von Schwefel, etc.
2. Durch Verwendung kohlenstofffreier Treibstoffe, wie Wasserstoff
3. Durch elektrisches Fliegen

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes



©DLR



©Bauhaus Luftfahrt

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

1. Durch alle Technologien, die den spez. Treibstoffverbrauch (SFC), das Gewicht (w_{OE}) und/oder die Aerodynamik (L/D) reduzieren
2. Durch alternative Kraftstoffe, die den Kohlenstoffkreislauf schließen
3. Durch alle operationellen Maßnahmen, die die Effizienz der Flugführung verbessern

Veränderung der Emissionsart

1. Durch Herstellung synthetischer (Designer-)Treibstoffe ohne Rückstände von Schwefel, etc.
2. Durch Verwendung kohlenstofffreier Treibstoffe, wie Wasserstoff
3. Durch elektrisches Fliegen

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen



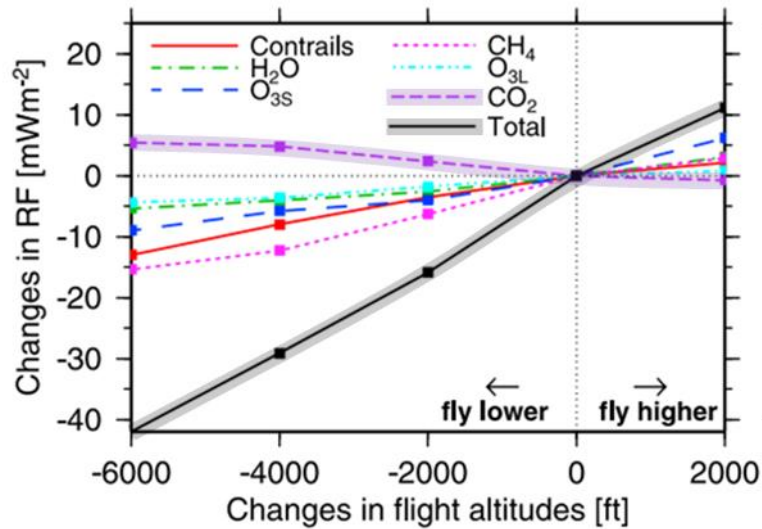
Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

Veränderung der Emissionsart

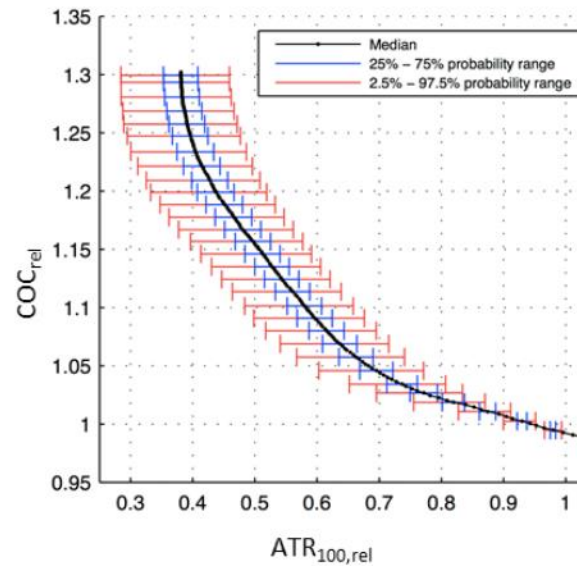
Veränderung des
Emissionsortes & -zeitpunktes

Veränderung der Flughöhe bei konstanter Fluggeschwindigkeit



Frömming et al. (2012)

„Tiefer und langsamer Fliegen“ mit Referenzflugzeug



Koch et al. (2013)
Dahlmann et al. (2016)

1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen

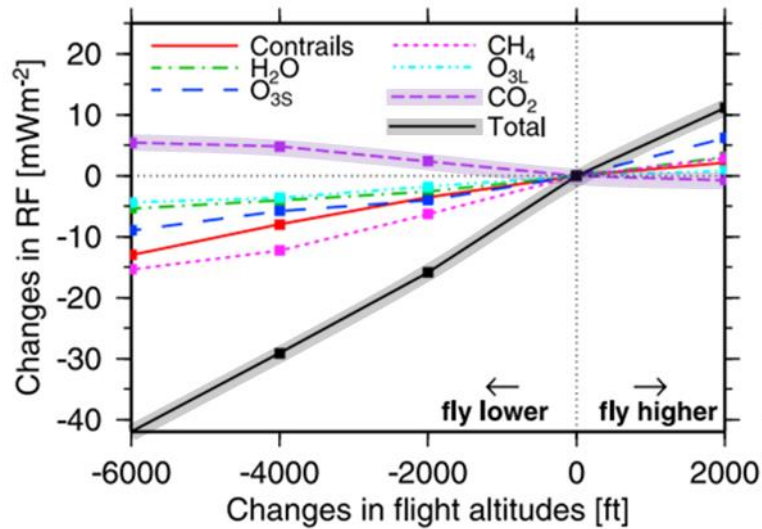
Operationelle & technologische Mitigationmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge

Veränderung der Emissionsart

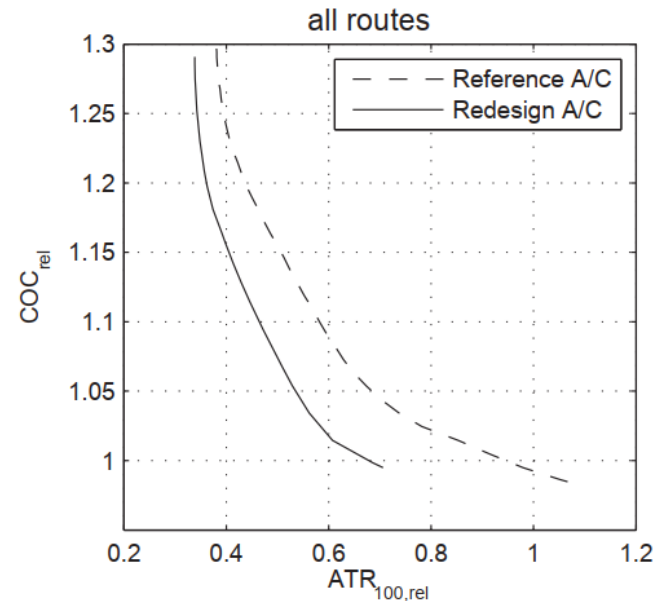
Veränderung des
Emissionsortes & -zeitpunktes

Veränderung der Flughöhe bei konstanter Fluggeschwindigkeit



Frömming et al. (2012)

„Tiefer und langsamer Fliegen“ mit klimaoptimiertem Flugzeug

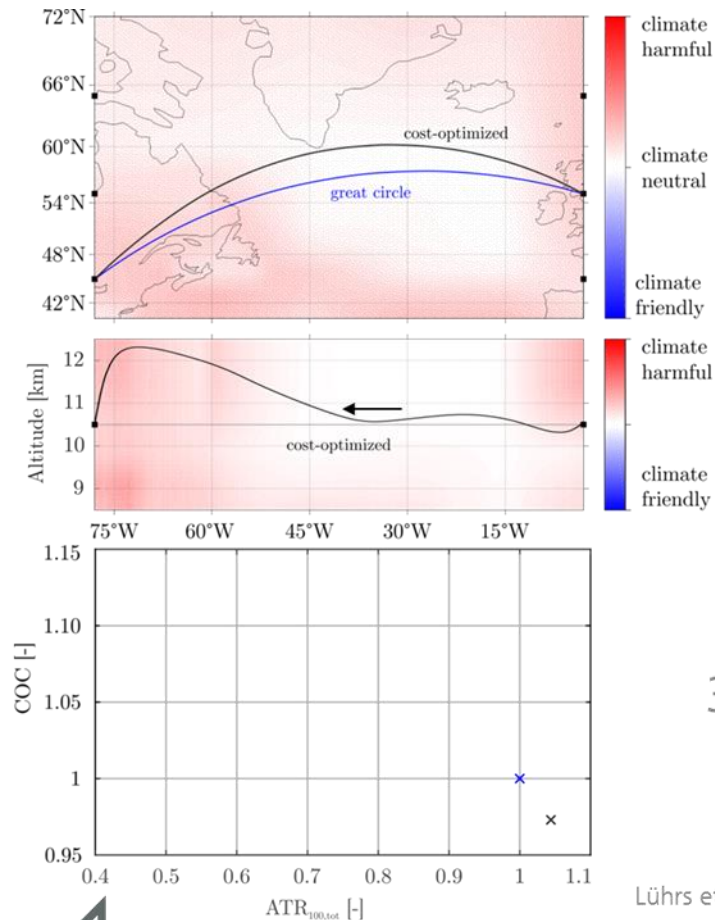


Koch et al. (2013)
Dahlmann et al. (2016)

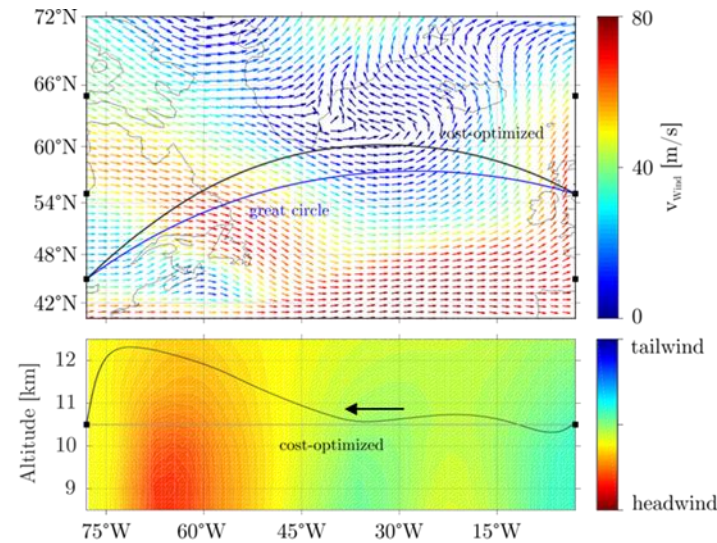
1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



Gewichtungsfaktor Kosten	1.000
Gewichtungsfaktor Klima	0.00
Betriebskosten (COC)	0.973
Klimawirkung (ATR)	1.044
Treibstoffverbrauch	0.960
Flugzeit	0.979

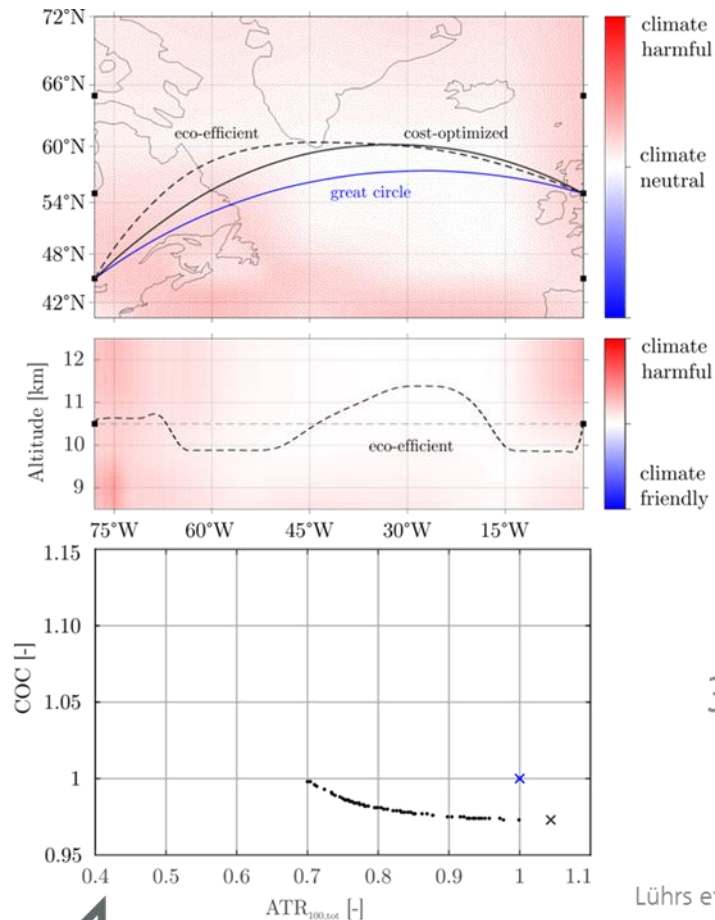
Lührs et al. (2016)

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

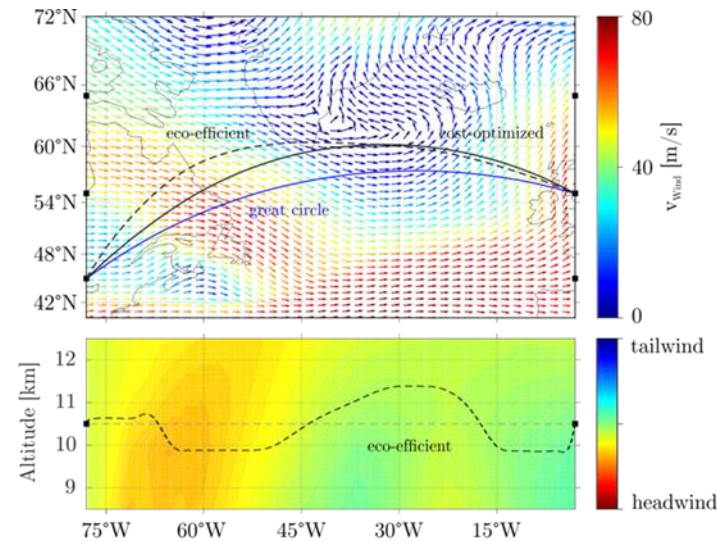
1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen
2. Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete (*taktische Flugroutenführung in Abhängigkeit der Wettersituation*)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



3D

Gewichtungsfaktor Kosten	0.736
Gewichtungsfaktor Klima	0.264
Betriebskosten (COC)	0.998
Klimawirkung (ATR)	0.700
Treibstoffverbrauch	1.002
Flugzeit	0.994

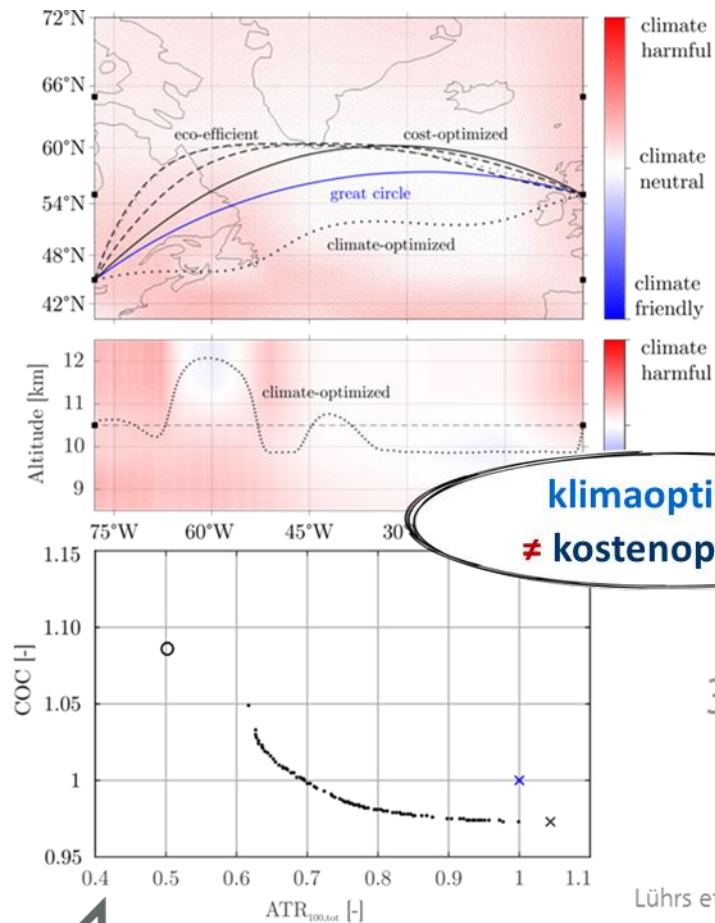
Lührs et al. (2016)

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

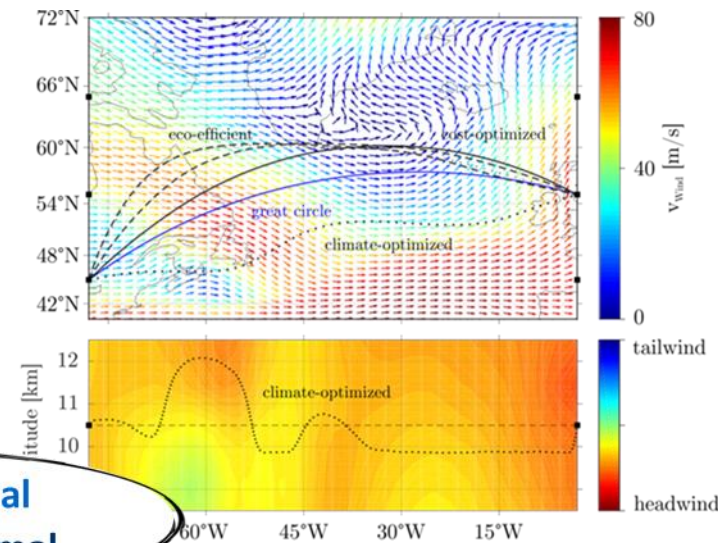
1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen
2. Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete (*taktische Flugroutenführung in Abhängigkeit der Wettersituation*)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



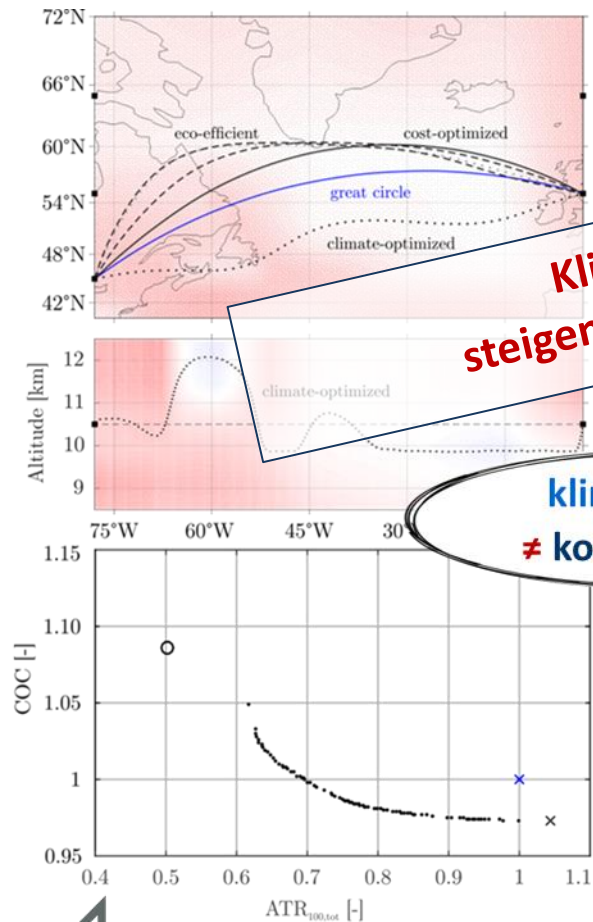
Gewichtungsfaktor Kosten	0.000
Gewichtungsfaktor Klima	1.000
Betriebskosten (COC)	1.086
Klimawirkung (ATR)	0.502
Treibstoffverbrauch	1.106
Flugzeit	0.982

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

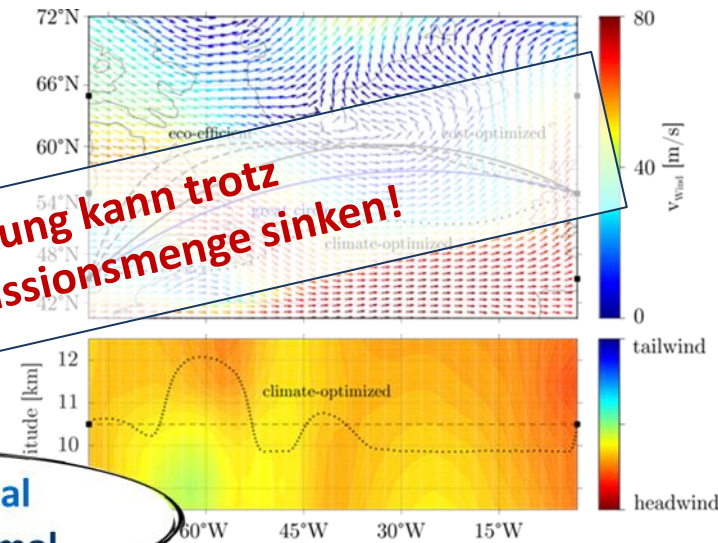
1. Durch strategische Veränderung der Reiseflughöhe auf allen Flügen
2. Durch teilweises oder vollständiges Umfliegen klimasensitiver Gebiete (*taktische Flugroutenführung in Abhängigkeit der Wettersituation*)

Operationelle & technologische Mitigationsmöglichkeiten in der Luftfahrt

Reduktion der Emissionsmenge



Veränderung der Emissionsart



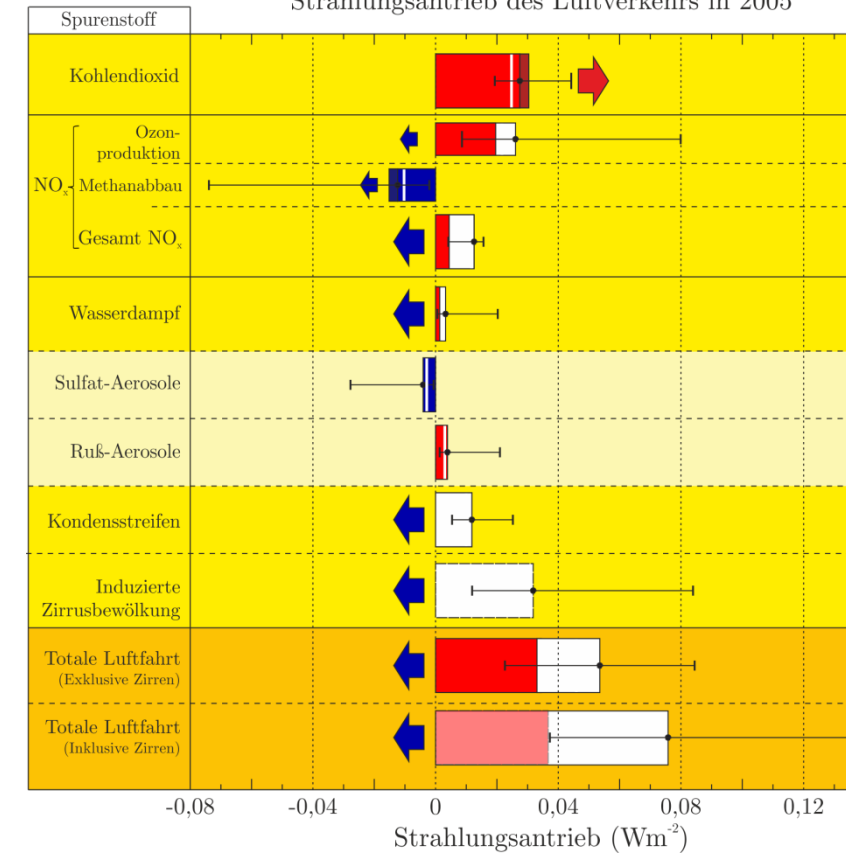
3D

Lührs et al. (2016)

Gewichtungsfaktor Kosten	0.000
Gewichtungsfaktor Klima	1.000
Betriebskosten (COC)	1.086
Klimawirkung (ATR)	0.502
Treibstoffverbrauch	1.106
Flugzeit	0.982

Veränderung des Emissionsortes & -zeitpunktes

Strahlungsantrieb des Luftverkehrs in 2005



(Qualitatives Gedankenexperiment)

Identifizierter Zielkonflikt

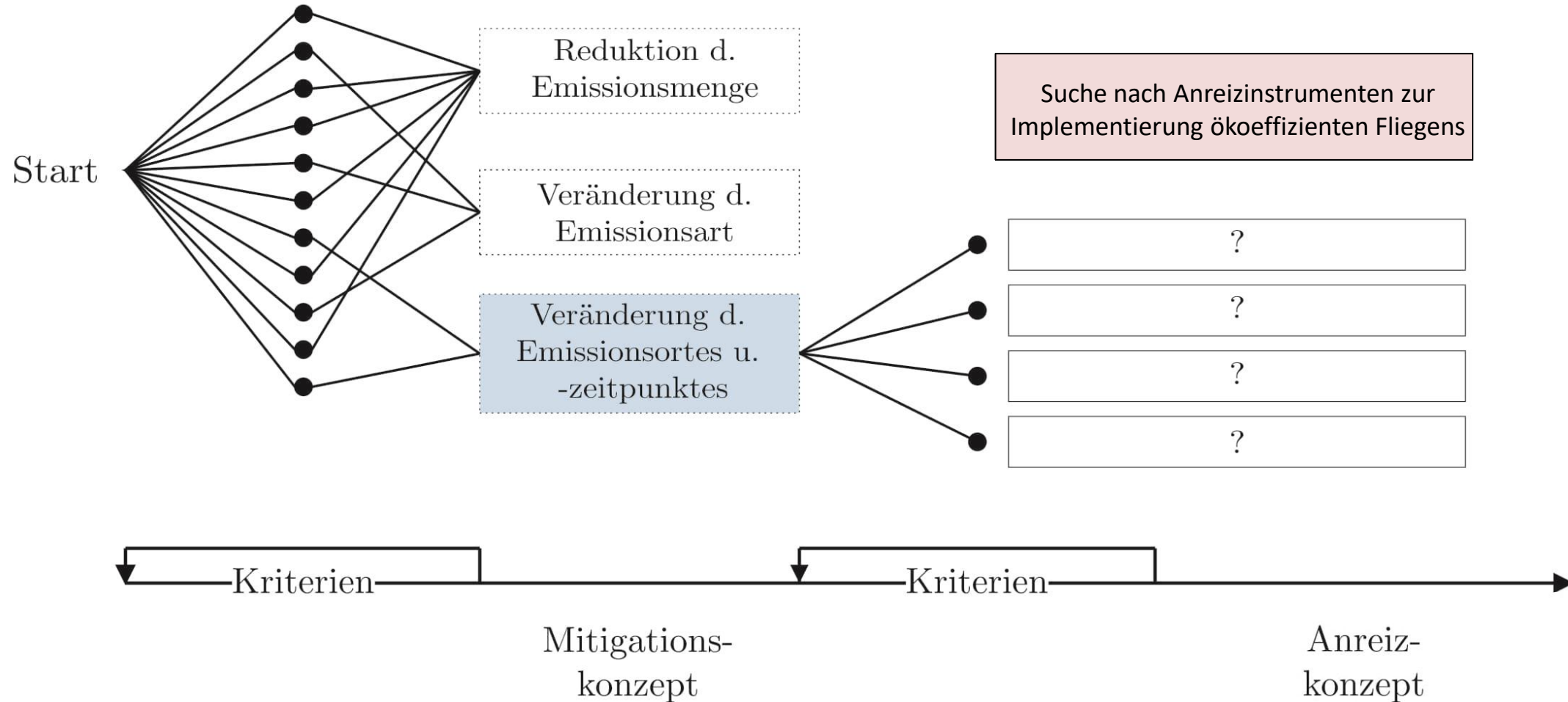
Klimafreundliches Fliegen ist aktuell nicht wirtschaftlich





Notwendigkeit von ökonomischen Instrumenten

Ansatzmöglichkeiten zur Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekte

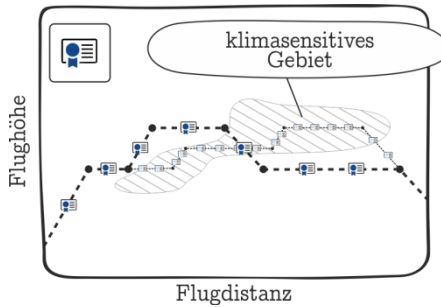
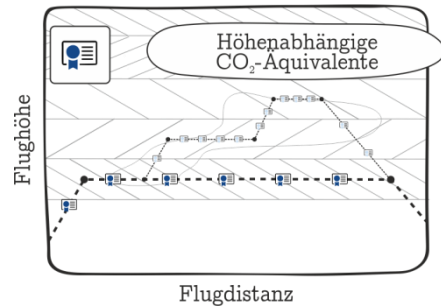


Notwendigkeit von ökonomischen Instrumenten

Ansatzmöglichkeiten zur Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekte

Integration in bestehende
Maßnahmen

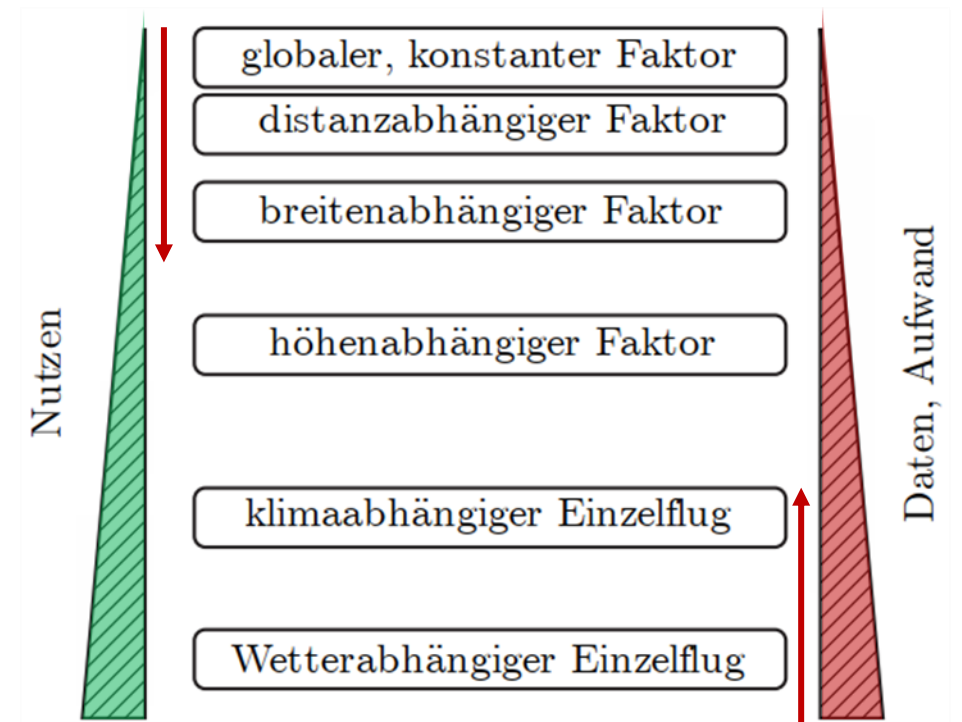
denkbare
Ansätze



...

Mitigationsanreiz vs.
Operationalisierbarkeit

Integration mithilfe von CO₂-Äquivalenten



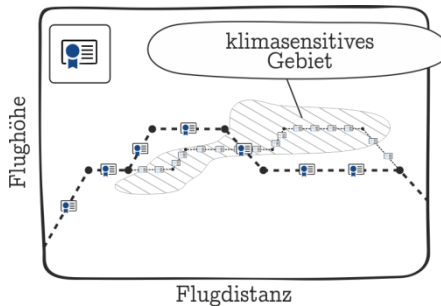
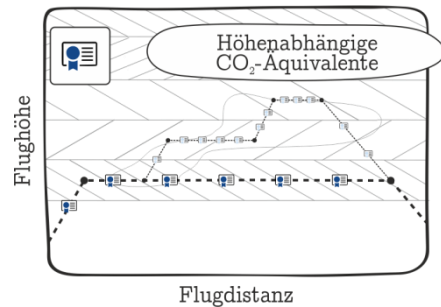
In Zusammenarbeit mit dem deutschen Umweltbundes (2019)

Notwendigkeit von ökonomischen Instrumenten

Ansatzmöglichkeiten zur Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekte

Integration in bestehende
Maßnahmen

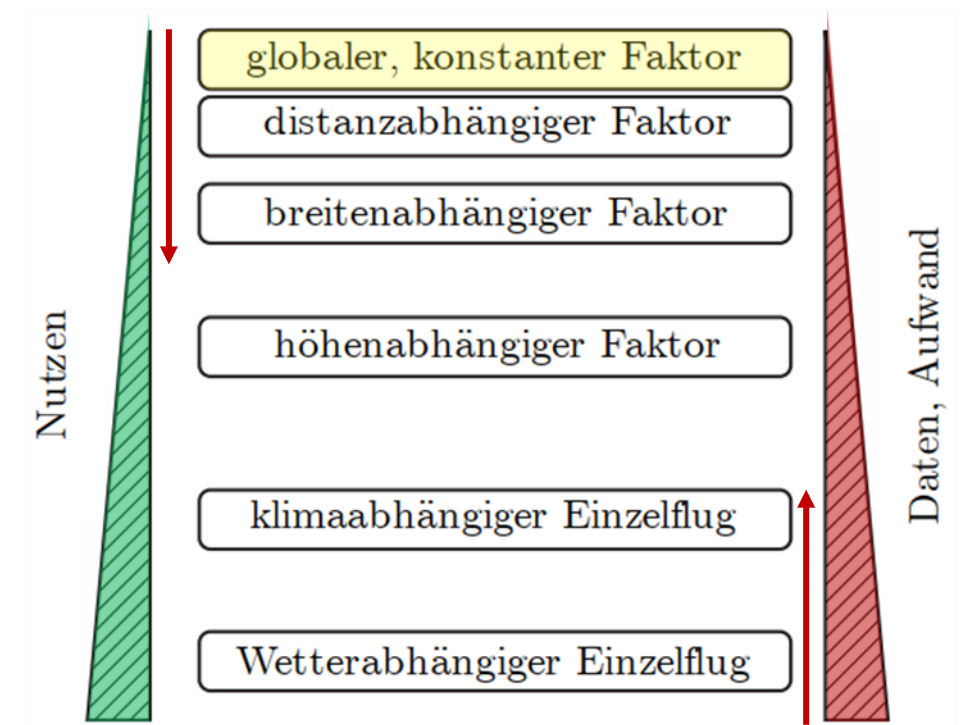
denkbare
Ansätze



...

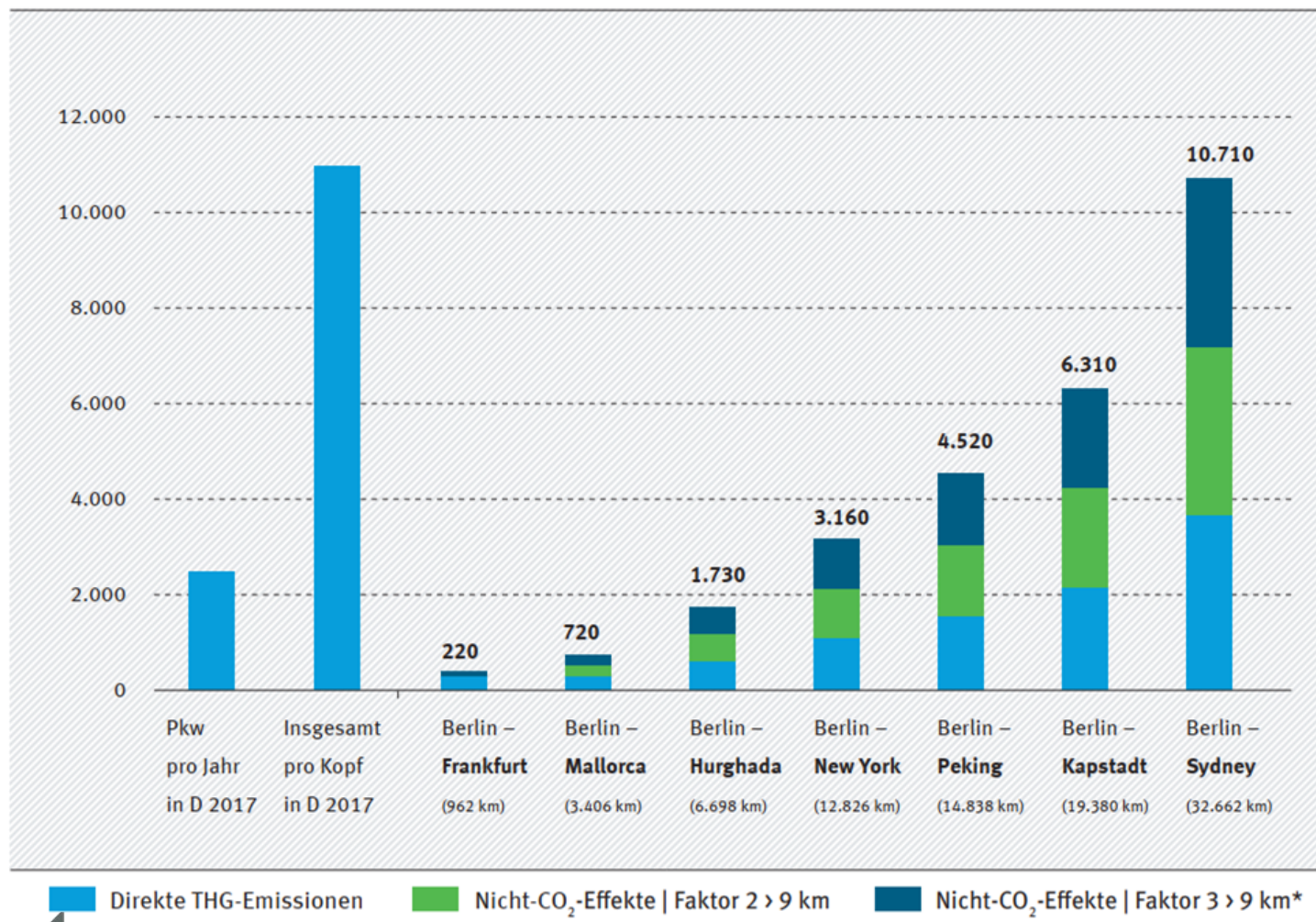
Mitigationsanreiz vs.
Operationalisierbarkeit

Integration mithilfe von CO₂-Äquivalenten



In Zusammenarbeit mit dem deutschen Umweltbundes (2019)

Klimawirkung von Hin- und Rückflug pro Person im Vergleich in kg CO₂-Äquivalente (*konstanter Faktor*)



* Differenz zu Faktor 2

Quelle: Berechnung des UBA nach atmosfair (2019)

- + Sehr einfache Berechnung
- + Tendenz richtig
- + Abschätzung des ökol. Fußabdruckes
- + (Schafft Anreize zur Flugvermeidung)
- Verstärkt Fokus auf CO₂-Reduktion
- Schafft keine Anreize zur Mitigation
- „Bestraft“ klimafreundliche Flugführung

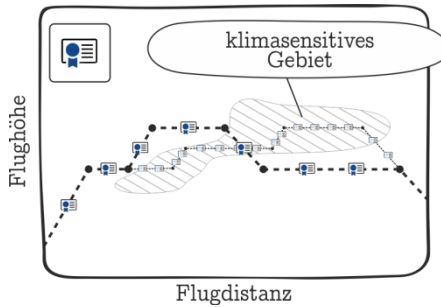
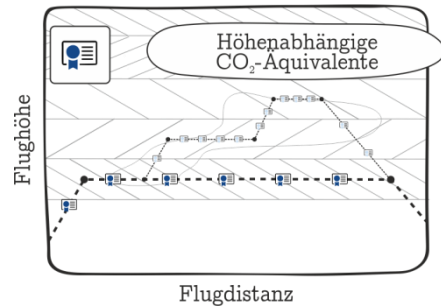
In Zusammenarbeit mit dem deutschen Umweltbundes (2019)

Notwendigkeit von ökonomischen Instrumenten

Ansatzmöglichkeiten zur Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekte

Integration in bestehende
Maßnahmen

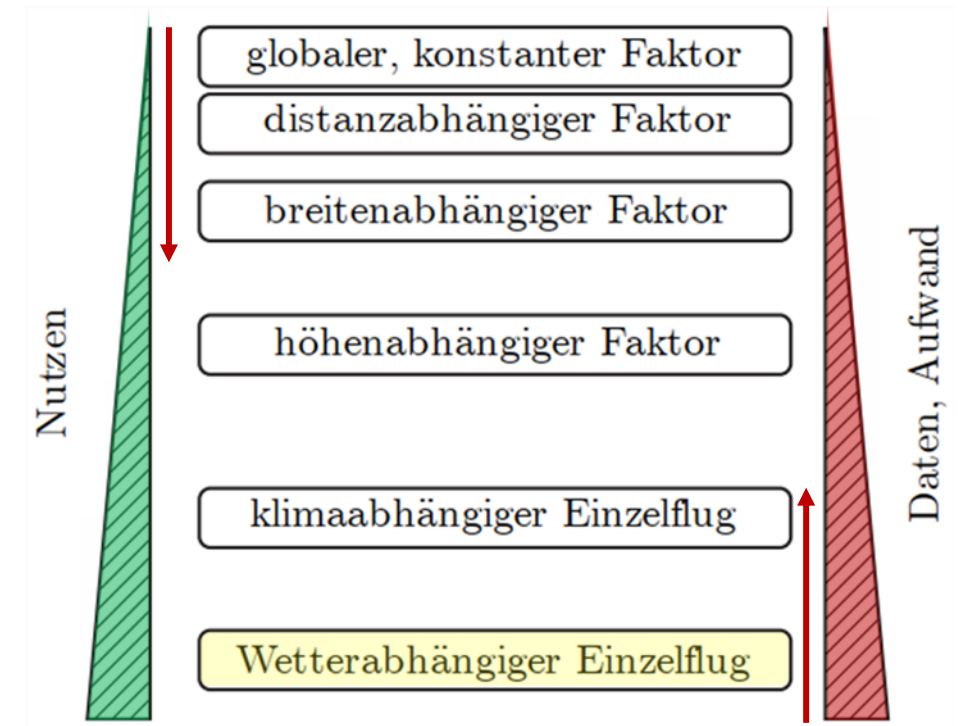
denkbare
Ansätze



...

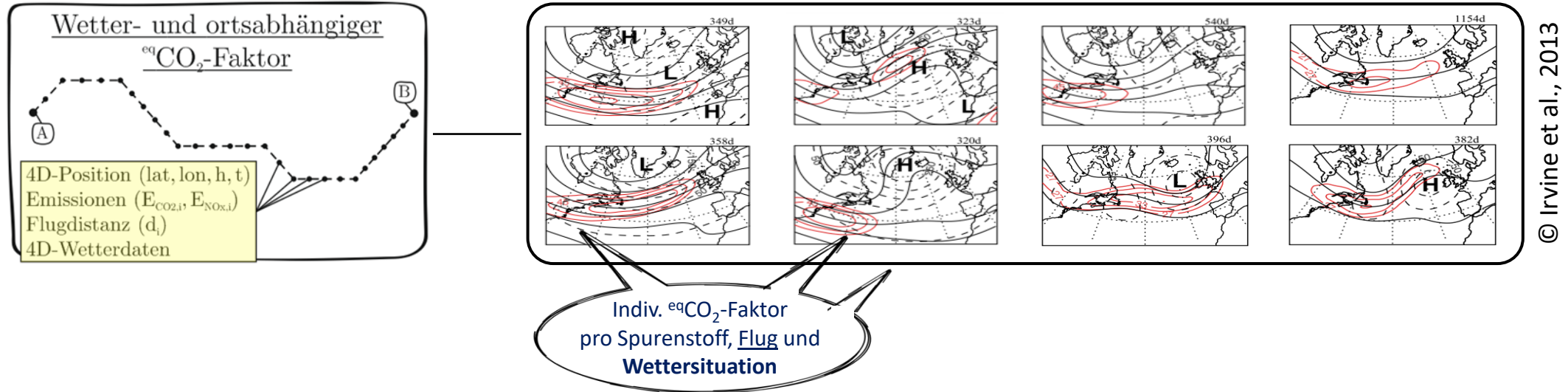
Mitigationsanreiz vs.
Operationalisierbarkeit

Integration mithilfe von CO₂-Äquivalenten



In Zusammenarbeit mit dem deutschen Umweltbundes (2019)

„Wetter- und ortsabhängiger CO₂-Äquivalenzfaktor“



- + Maximaler Anreiz zur Reduktion der Klimawirkung
- + Maximale Genauigkeit
- + (Schafft Anreize zur Flugvermeidung)
- Sehr aufwendige Berichterstellung, Überwachung und Verifizierung
(Höhe der CO₂-Äquivalente auf einer Verbindung variieren von Flug zu Flug)

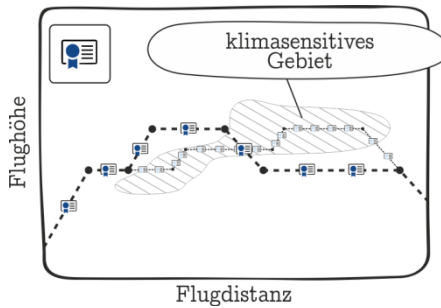
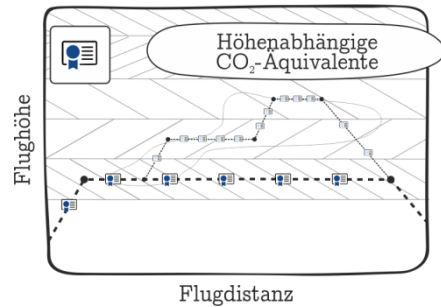
Notwendigkeit von ökonomischen Instrumenten

Ansatzmöglichkeiten zur Berücksichtigung von Nicht-CO₂-Effekte

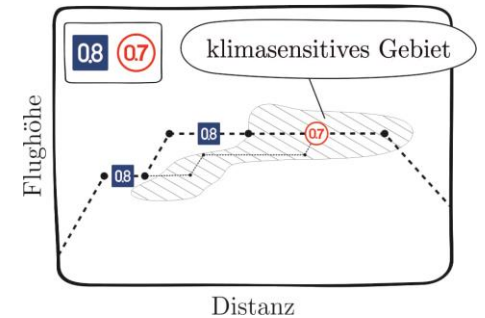
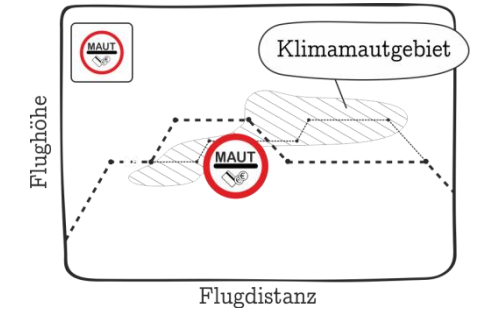
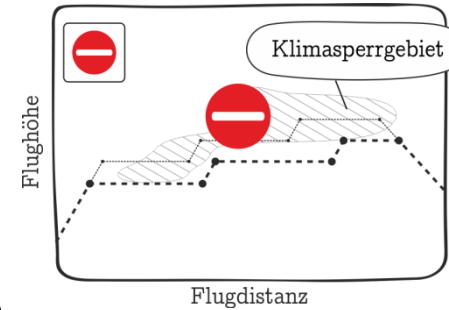
Integration in bestehende
Maßnahmen

denkbare
Ansätze

Einführung von „flankierenden
Instrumente“



...



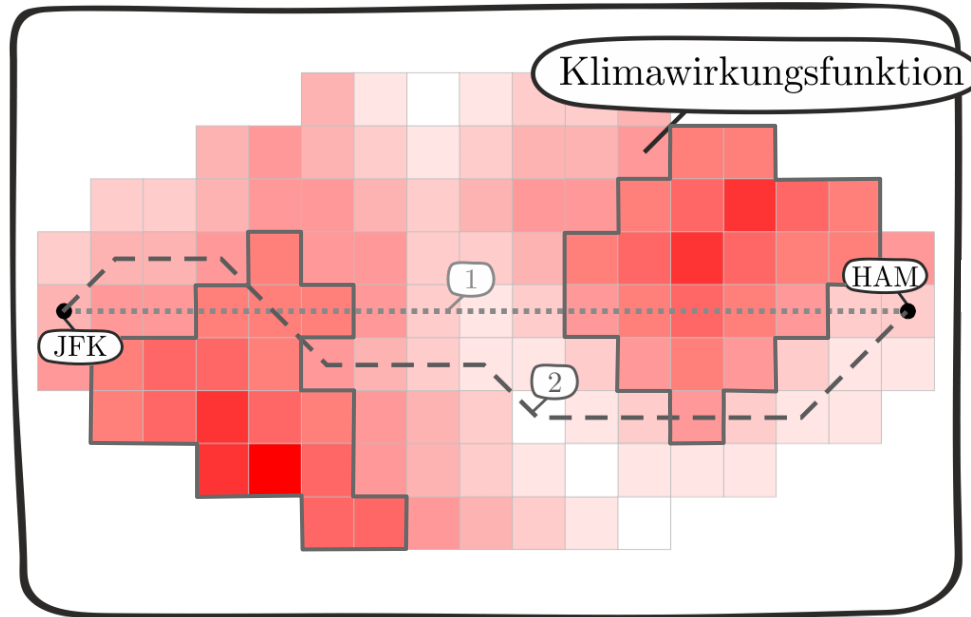
...



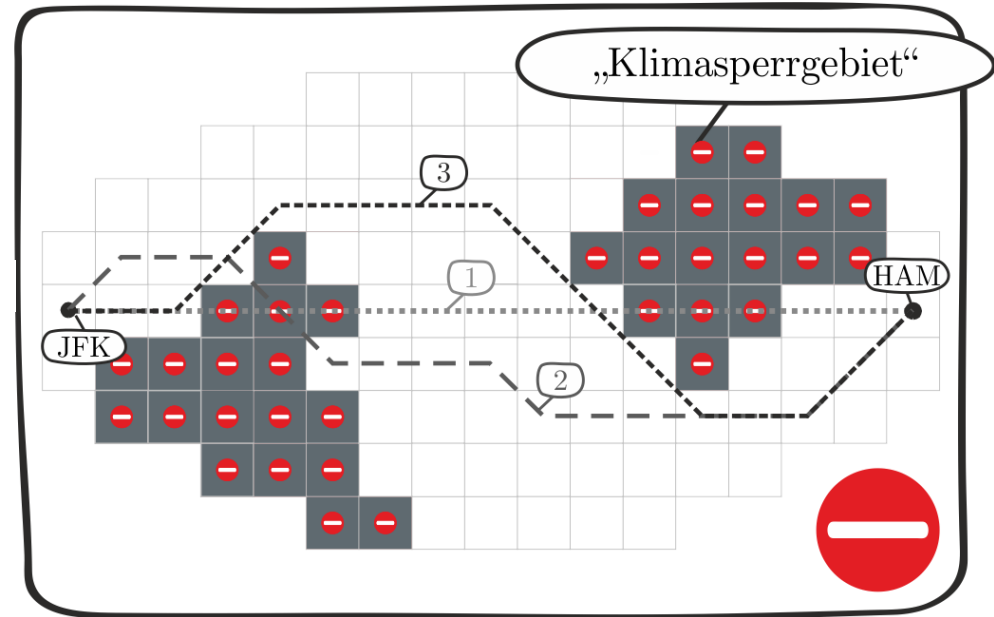
Konzept der Klimasperrgebiete

Restriktiver Lösungsansatz

Fokus auf besonders klimasensitive Regionen



Erzeuge eine **Notwendigkeit** zur Mitigation



- (1) Zeitoptimale Flugtrajektorie
- (2) Klimaoptimale Flugtrajektorie
- (3) Kostenoptimale Flugtrajektorie

$$CRA(\mathbf{z}, t) = \begin{cases} 1, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) \geq c_{thr} \\ 0, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) < c_{thr} \end{cases}$$

CRA := Climate-Restricted Airspace Area
CCF := Climate change function
 c_{thr} := Schwellenwert

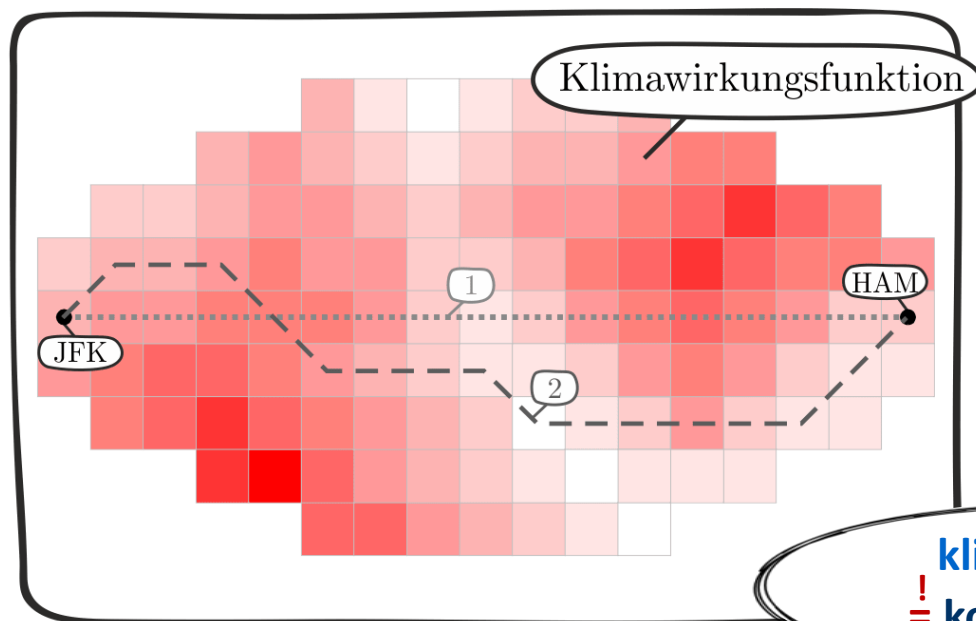
Niklaß et al. (2017a,b)



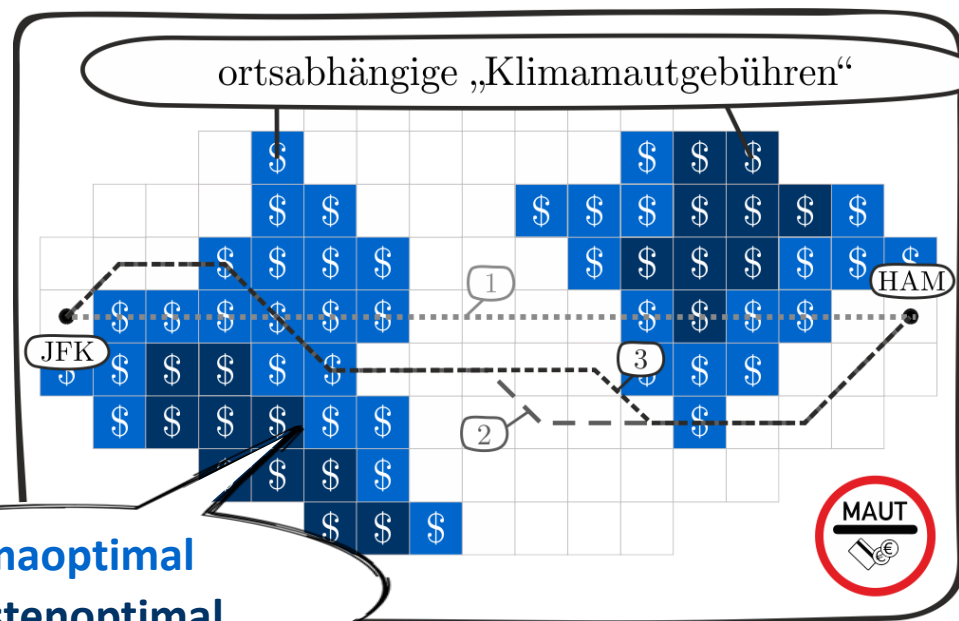
Konzept der Klimamautgebiete

Preisbasierter Lösungsansatz

Fokus auf besonders klimasensitive Regionen



Erzeuge einen **finanziellen Anreiz** zur Mitigation



klimaaoptimal
! kostenoptimal

- (1) Zeitoptimale Flugtrajektorie
- (2) Klimaoptimale Flugtrajektorie
- (3) Kostenoptimale Flugtrajektorie

$$CCA(\mathbf{z}, t) = \begin{cases} U_{c,j}, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) \geq c_{thr} \\ 0, & \text{falls } CCF(\mathbf{z}, t) < c_{thr} \end{cases}$$

CCA := Climate-Charged Airspace Area
CCF := Climate change function
 c_{thr} := Schwellenwert
 $U_{c,j}$:= Klimamautgebührenhöhen

Niklaß (2019)
Niklaß et al. (2018)

Konzept der Klimamautgebiete

Berechnung der Klimamautgebührenhöhe

$$(1) \quad \text{COC} = C_{\text{Fuel}} + C_{\text{Crew}} + C_{\text{Maintenance}} + C_{\text{Landing}} + C_{\text{Navigation}} + C_{\text{Climate}}$$

$$(2) \quad C_{\text{Climate}} = U_{cj} \cdot \left(\frac{\text{MTOW}}{k_1} \right)^{k_2} \cdot d_j \cdot I_{AC}$$

Gebühr in Abhängigkeit des maximalen Abfluggewichtes

Anreizfaktor für umweltfreundliche Technologien

Fester Gebührensatz pro Kilometer [$\$/km$]

Zurückgelegte Distanz im Klimamautgebiet

mit $I_{AC} = \begin{cases} 1 & \text{für aktuelle Technologiestandards} \\ \vdots & \text{für klimafreundlichere Technologien} \\ 0 & \text{für emissionslose Luftfahrzeuge} \end{cases}$

Niklaß (2019)
Niklaß et al. (2018)

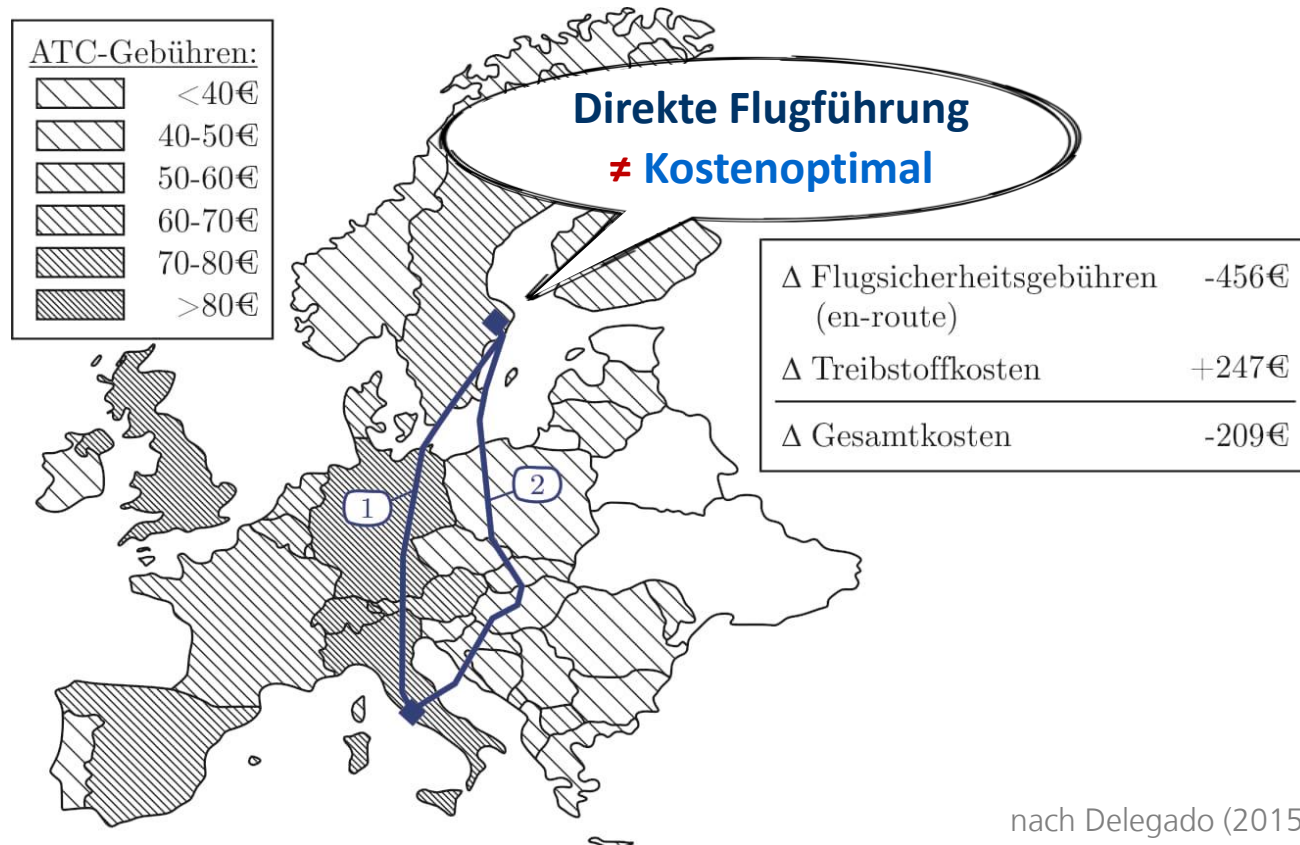
In Analogie zu en-route Flugführungsgebühren (C_{ei}):

$$C_{ei} = U_{ei} \cdot \left(\frac{\text{MTOW}}{k_1} \right)^{k_2} \cdot d_i$$



Praktikabilität eines preisbasierten Re-Routingansatzes in der Luftfahrt

Einfluss der Flugroutenführung auf die Gesamtbetriebskosten



nach Delegado (2015)

“If an airline chooses to fly a longer route around an expensive airspace, it’s relatively cheap these days, in terms of additional fuel burn, to do this.”



Flemming Nyrup (2016)
Performance Manager at MUAC
Eurocontrol

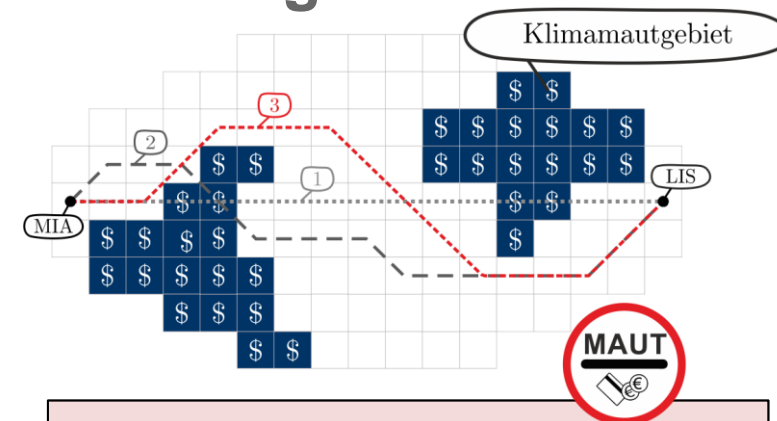
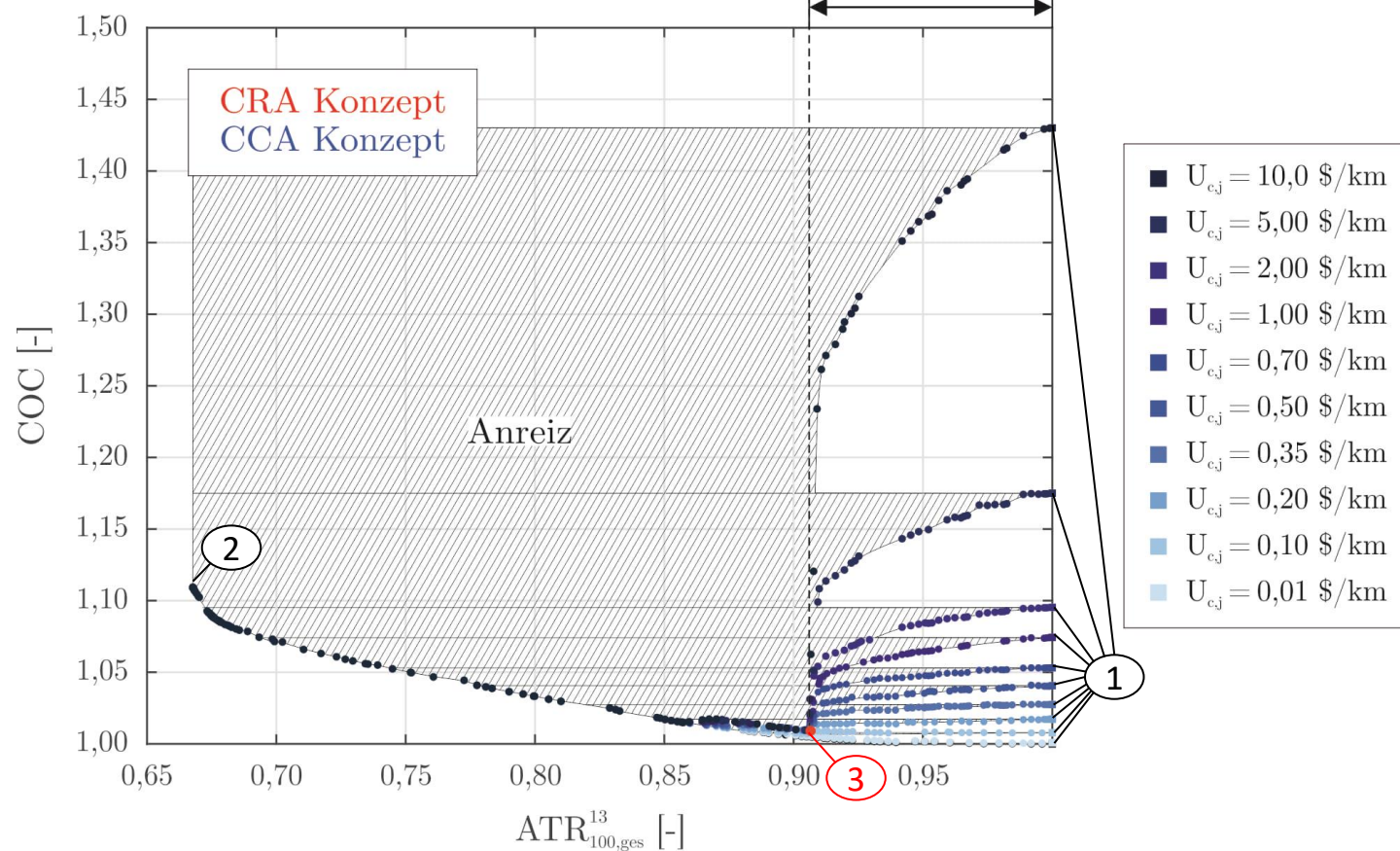
Eurocontrol (2016)

Einfluss der Klimamautgebührenhöhen auf die Anreizwirkung

Konzept der Klimamautgebiete

Mindestmitigationspotenzial:

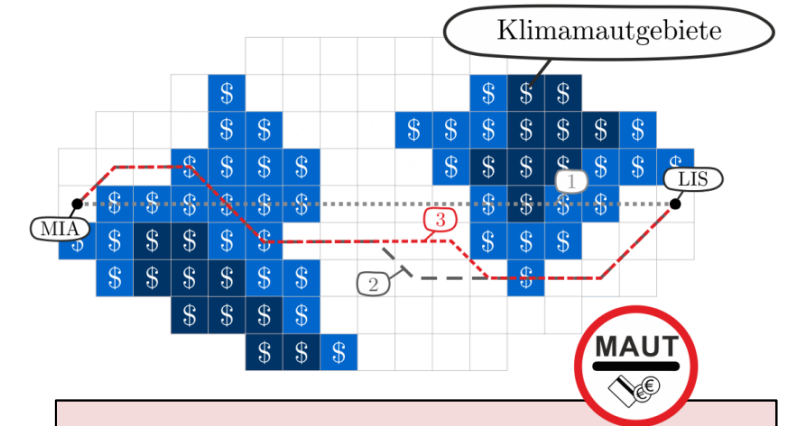
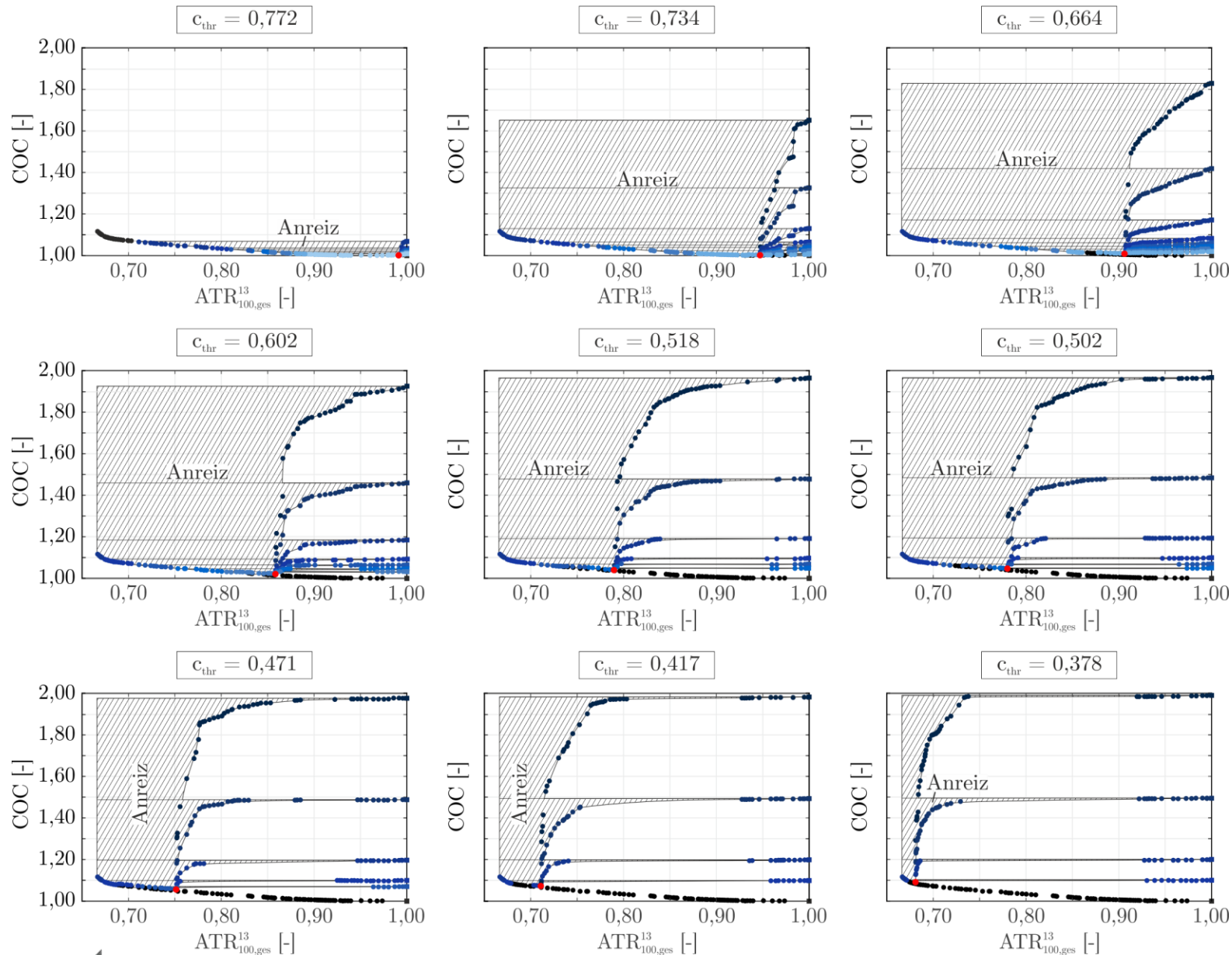
$$\Delta ATR_{\min} = -9,4\%$$



Sensitivitätsanalyse der Gebührenhöhe

Anzahl Routen	1
Gebührenhöhe	variabel
Schwellenwert	konstant
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel

Der Mitigationsanreiz des Konzeptes steigt mit steigender Gebührenhöhe an.



Sensitivitätsanalyse der Gebührenhöhe

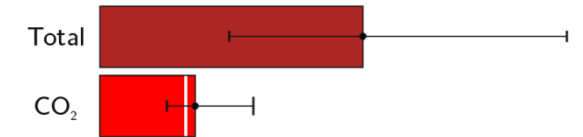
Anzahl Routen	1
Gebührenhöhe	variabel
Schwellenwert	variabel
Klimawirkungsfunktionen	Jahresmittel

Durch gezielte Wahl von Schwellenwert & Gebührenhöhe kann auf einer Route für jedes Mitigationspotenzial ein finanzieller Anreiz fürs klimafreundliche Fliegen erzeugt werden!



Zusammenfassung

- Nicht-CO₂-Klimaeffekte spielen in der Luftfahrt eine wichtige Rolle
- Nicht-CO₂-Klimaeffekte hängen von Emissionsort und der Wetterlage ab
- Klimafreundlicheres Fliegen ist aktuell nicht kostenfreundlich
- Kombination aus technologischen, operativen und umweltökonomischen Maßnahmen notwendig, um Klimawirkung der Luftfahrt zu reduzieren



Fragen?

Dr.-Ing. Malte Niklaß

DLR | Lufttransportsysteme | Hamburg

+49 (0)40 2489641 214 | malte.niklass@dlr.de

